

# Structure et dynamique du manteau profond de la terre

## 6- Dynamique du manteau profond

Barbara Romanowicz - Cours 2012  
-Chaire de Physique de l'Intérieur de la Terre  
Collège de France  
5 Novembre 2012

# Nature des ULVZ: considérations dynamiques

- La convection dans le manteau profond est-elle assez vigoureuse pour maintenir dynamiquement des petites ULVZ plus denses que le manteau ambiant sans former de couche uniforme dense à la CMB?
- Comment éviter l'entraînement de petits volumes d'ULVZ et le mélange avec le manteau ambiant?
- Effet des plaques accumulées dans la D'' sur la forme et la position des LLSVP et donc celles des ULVZ?

- *McNamara et al (2010)*:
  - Modèle de convection en 2D ("Citcom" modifié)
  - Haute résolution (~ km à la base du manteau)
  - 3 compositions différentes (densités diff.):
    - Manteau ambiant
    - LLSVP
    - ULVZ
  - Résolvent les équations de conservation de masse, moment cinétique, énergie dans l'approximation de Boussinesq (manteau incompressible)
  - Viscosité dépend de la température
  - Traceurs utilisés pour repérer le champ compositionnel

→ Nombre de Rayleigh thermique:

→ Rapport des forces de gravité aux forces visqueuses

$$Ra = \frac{\rho_0 g \alpha_0 \Delta T h^3}{\eta_0 \kappa_0} \quad \sim 5 \times 10^7$$

→ Valeurs de référence:

→  $\rho_0 \sim 3500 \text{ kg/m}^3$

→  $g \sim 10 \text{ m/s}^2$

→  $\alpha_0 \sim 10^{-5} \text{ K}^{-1}$  expansion thermique

→  $\Delta T \sim 3000 \text{ K}$  (diff. de temp. entre le noyau et la surface)

→  $\eta_0 \sim 5 \times 10^{20} \text{ Pa s}$  viscosité du manteau supérieur

→  $\kappa_0 \sim 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}$  diffusivité thermique

→  $h$  épaisseur du manteau

→ Rapport de flottabilité pour le matériau dense:

$$B = \frac{\Delta \rho_c}{\rho_0 \alpha_0 \Delta T}$$

Cas 1:

$B=1$

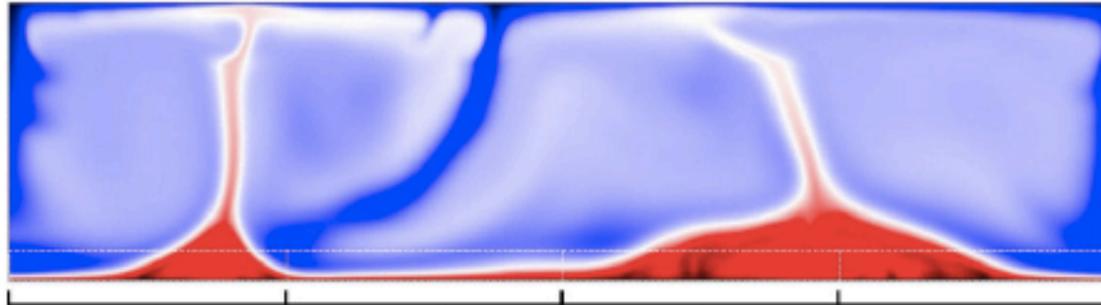
$\Delta\rho/\rho: 2.5-5\%$



composition

b

$t=250\text{Ma}$



Température

c d e f

c

Manteau ambiant



ULVZ



"LLSVP"

$B=0.8$

Conditions initiales:

Couche uniforme de 290 km d'épaisseur  $B=0.8$  (10% du volume total)

Couche fine de 5.8 km d'épaisseur  $B=1$  (0.2% du volume total)

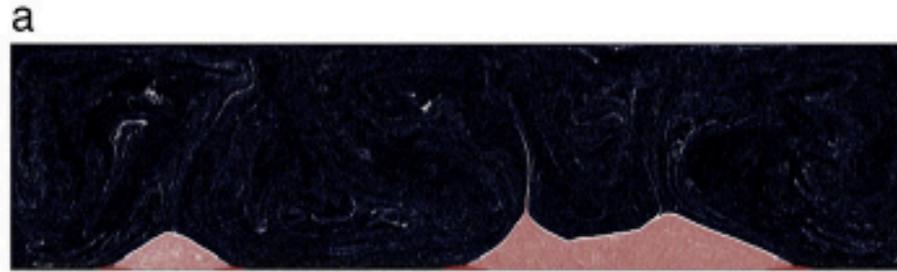
Dans ce cas, le mélange des ULVZ dans LLSVP se fait en moins de 1 Ga

*McNamara et al., 2010*

Cas 2:

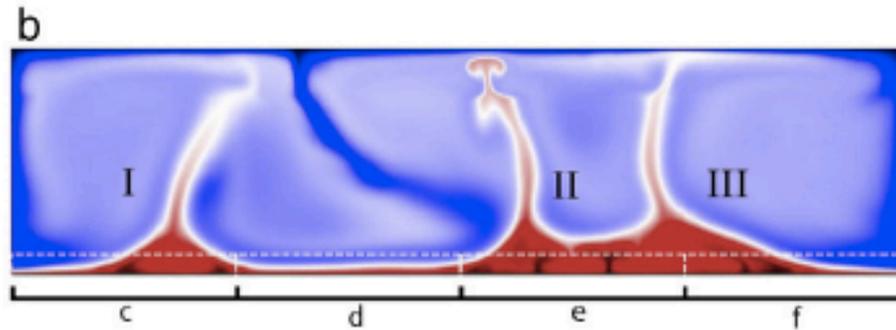
$B=2$

$\Delta\rho/\rho: 5-10\%$



Composition

$t=630\text{Ma}$



Température

Manteau ambiant



“LLSVP”  
 $B=0.8$

ULVZ

Dans ce cas, le matériau ULVZ est suffisamment dense pour ne pas être entraîné dans les LLSVP

ULVZ forment des structures stables de  $\sim 40$  km de hauteur et  $\sim 500$  km de largeur

*McNamara et al.,  
2010*

- > Lorsque la densité augmente, les ULVZ deviennent plus fines et leur largeur augmente
- > elles se positionnent toujours en bordure des LLSVP

Case	$B_{ULVZ}$	$\Delta\rho/\rho$	Typical ULVZ height (km)	Typical ULVZ width (km)
1	1.0	2.5–5.0%	–	–
2	2.0	5.0–10.0%	45	550
3	3.0	7.5–15.0%	40	720
4	4.0	10.0–20.0%	30	1150
5	2.0	5.0–10.0%	30	570

- > variations de température conduisent à des variations importantes de viscosité entre les ULVZ, LLSVP et le manteau ambiant
- > ULVZ 10 fois moins visqueuses que LLSVP
- > 100-1000 fois moins visqueuses que le manteau ambiant

Cas 5 = cas 2 avec ULVZ 10 fois moins visqueuses que LLSVP (en plus de la variation avec la température: ULVZ plus fines)

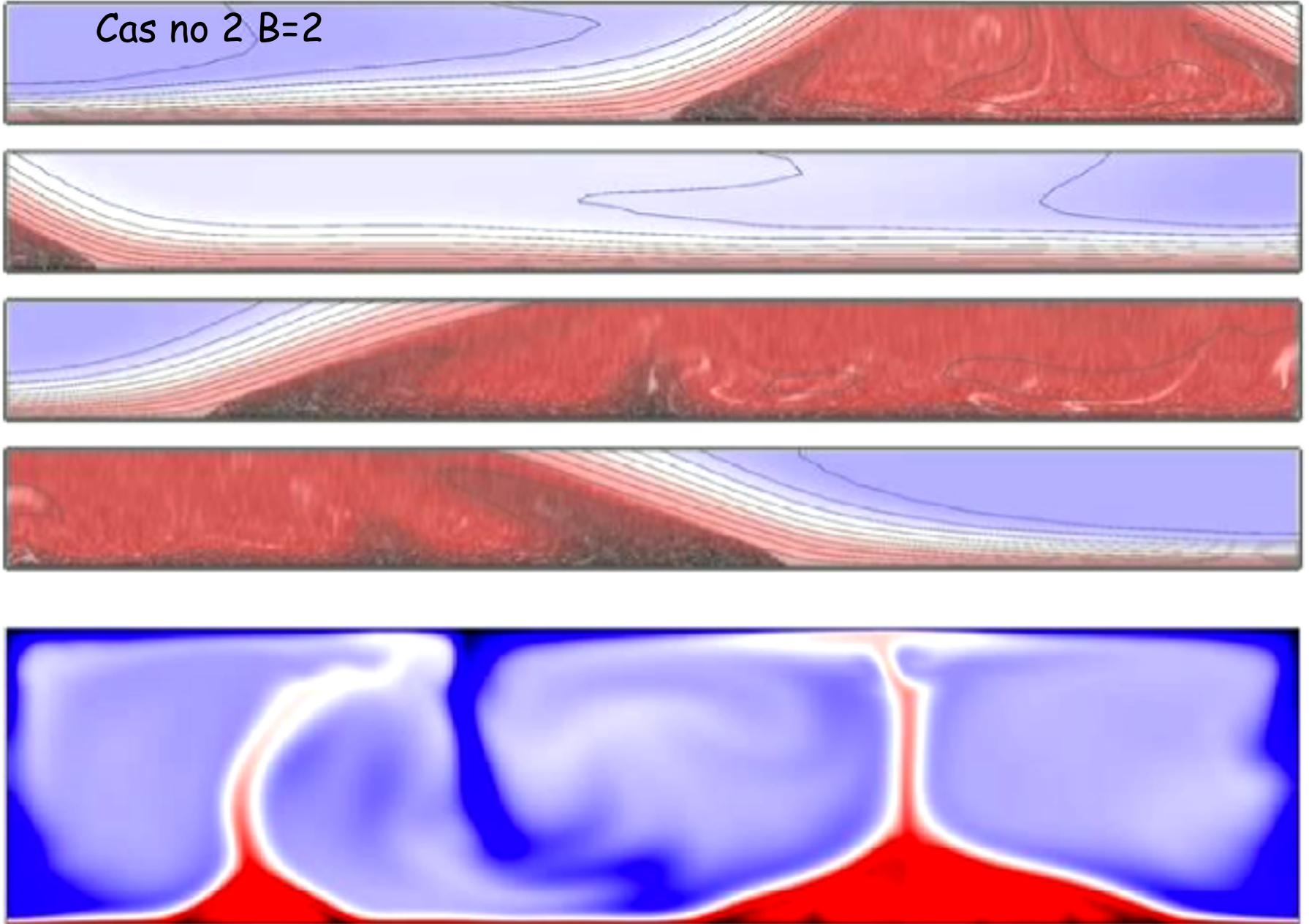
- *McNamara et al. (2010)*: pour du matériau de composition telle que la densité est supérieure à celle du manteau ambiant de 5% ou plus, des ULVZ peuvent se former à la base du manteau et restent en bordure des LLSVP
- Suppose une composition différente des ULVZ, la fusion partielle ne suffit pas
- Structure asymétrique des ULVZ pourrait être testée sismiquement

Cas no 1 B=1



*McNamara et al.,  
2010*

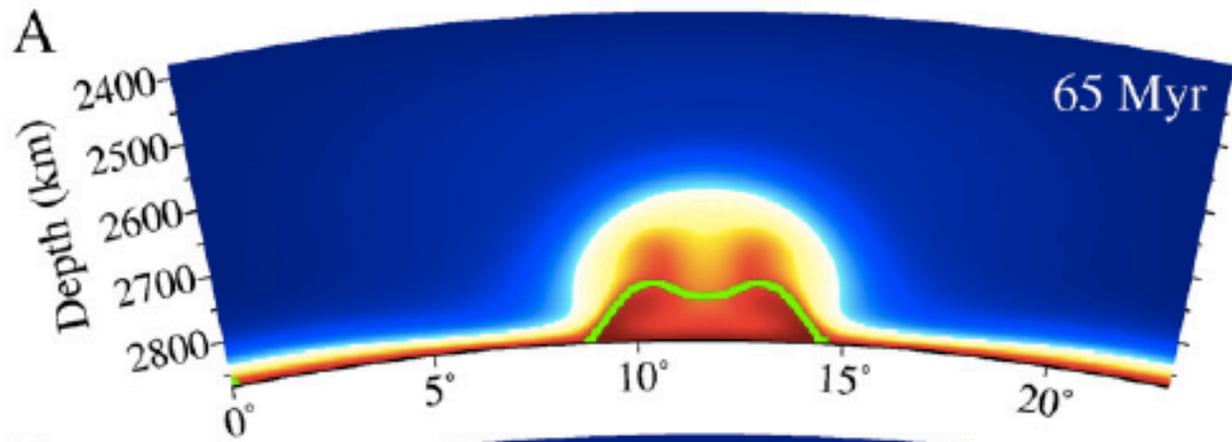
Cas no 2 B=2



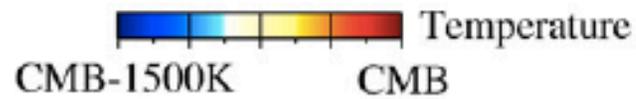
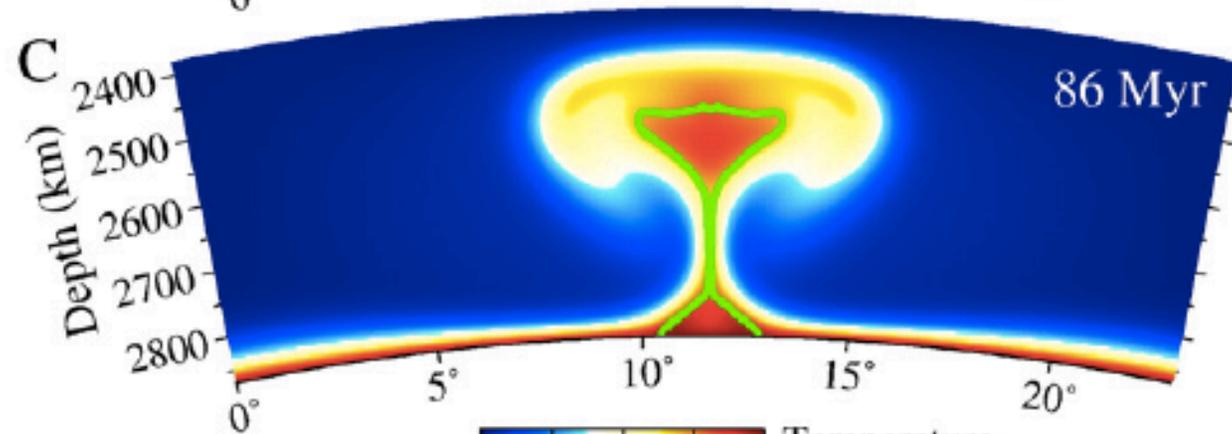
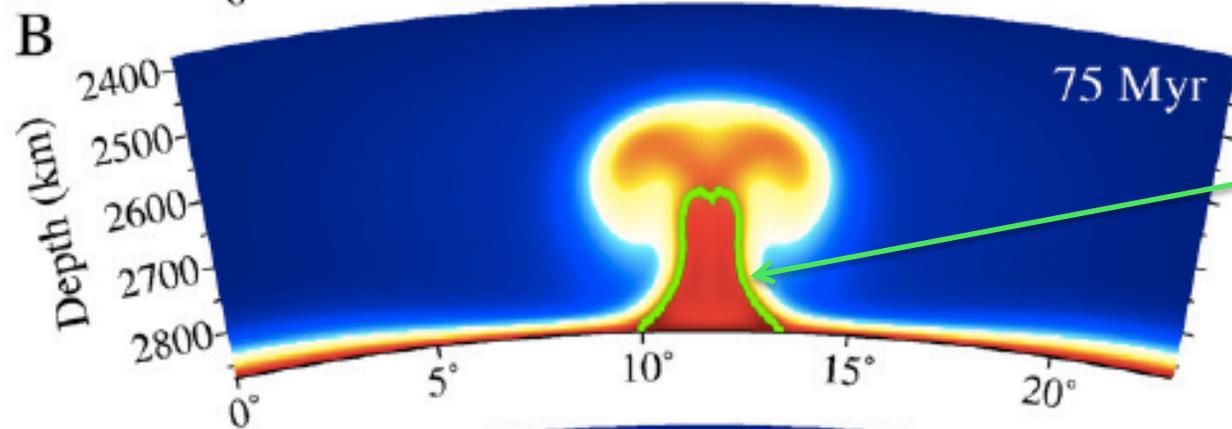
*McNamara et al.,  
2010*

- *En 3D (géométrie cylindrique): Bower et al. (2011)*
  - Modélisation dynamique d'une structure avec (Mg, Fe)O enrichi en fer à l'état solide
  - Approximation de Boussinesq (manteau incompressible) CitcomS
  - Viscosité dépend de la température (loi d'Arrhénius)
  - ULVZ représentées par "traceurs" advectés 500 km au dessus de la CMB
  - Exploration en fonction de  $B$  (buoyancy number) et de l'épaisseur de la couche dense initiale

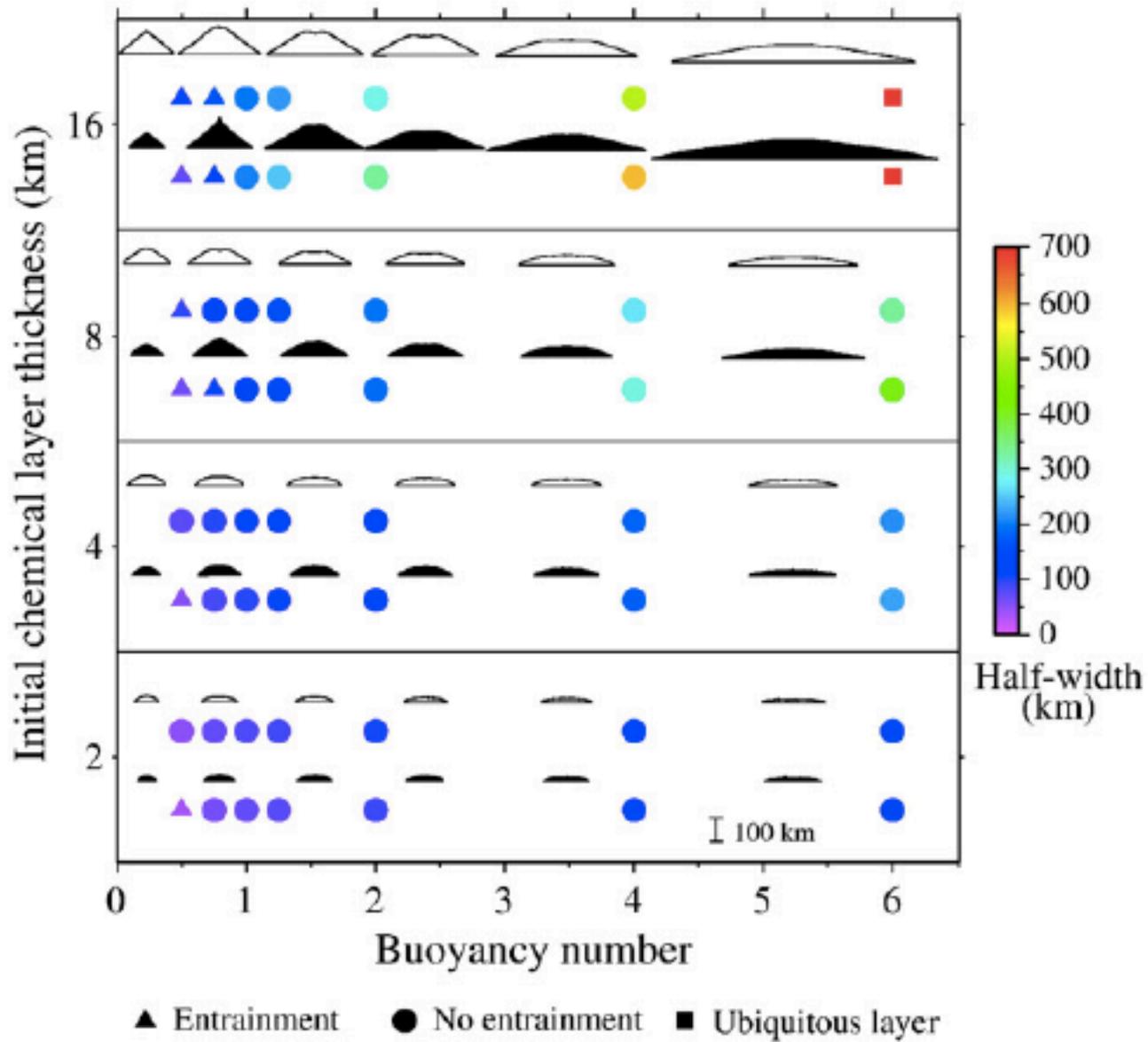
Evolution  
initiale



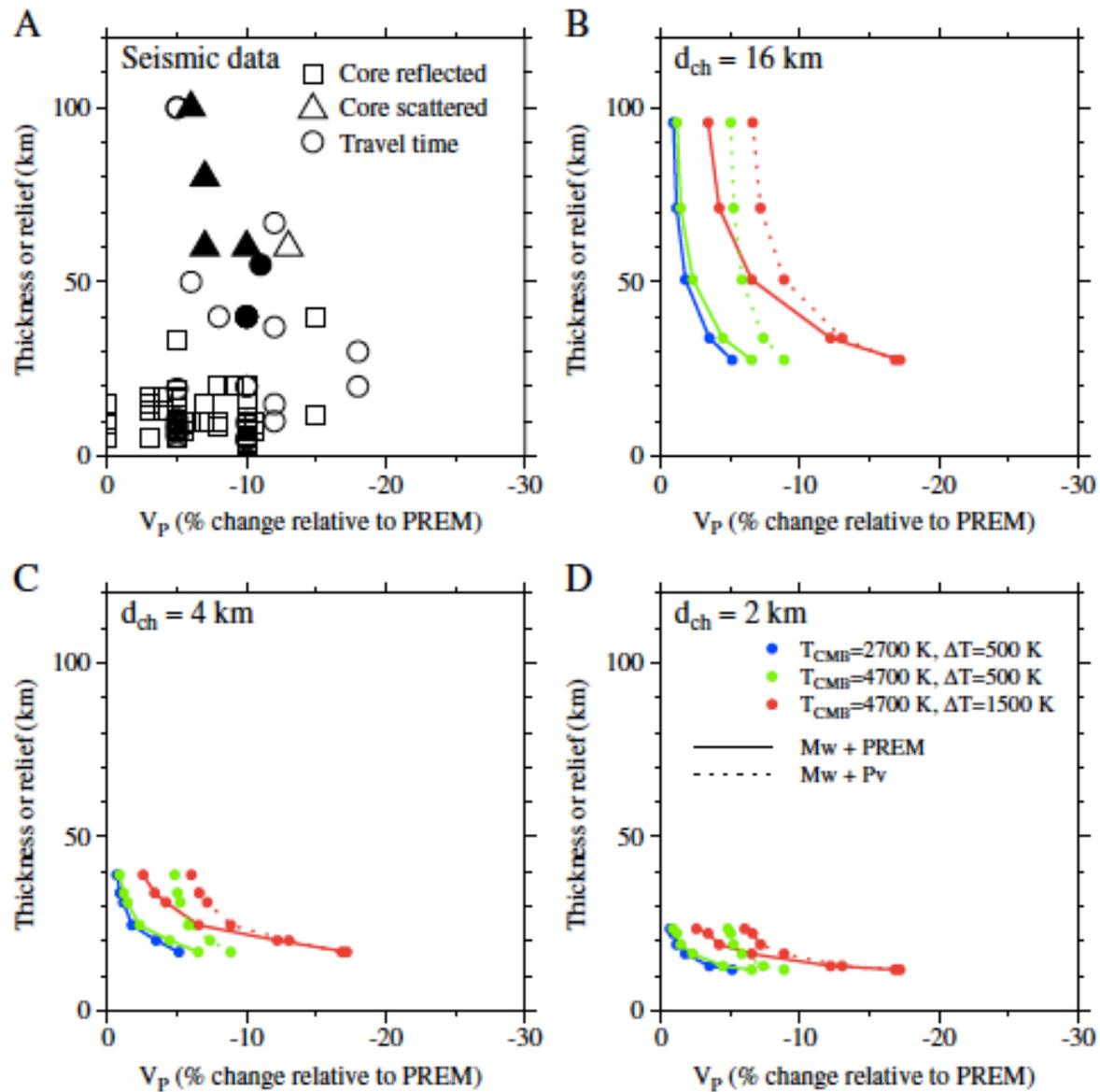
Exemple:  
 $B=0.5$   
 $d=16$  km



*Bower et al., 2011*



*Bower et al., 2011*



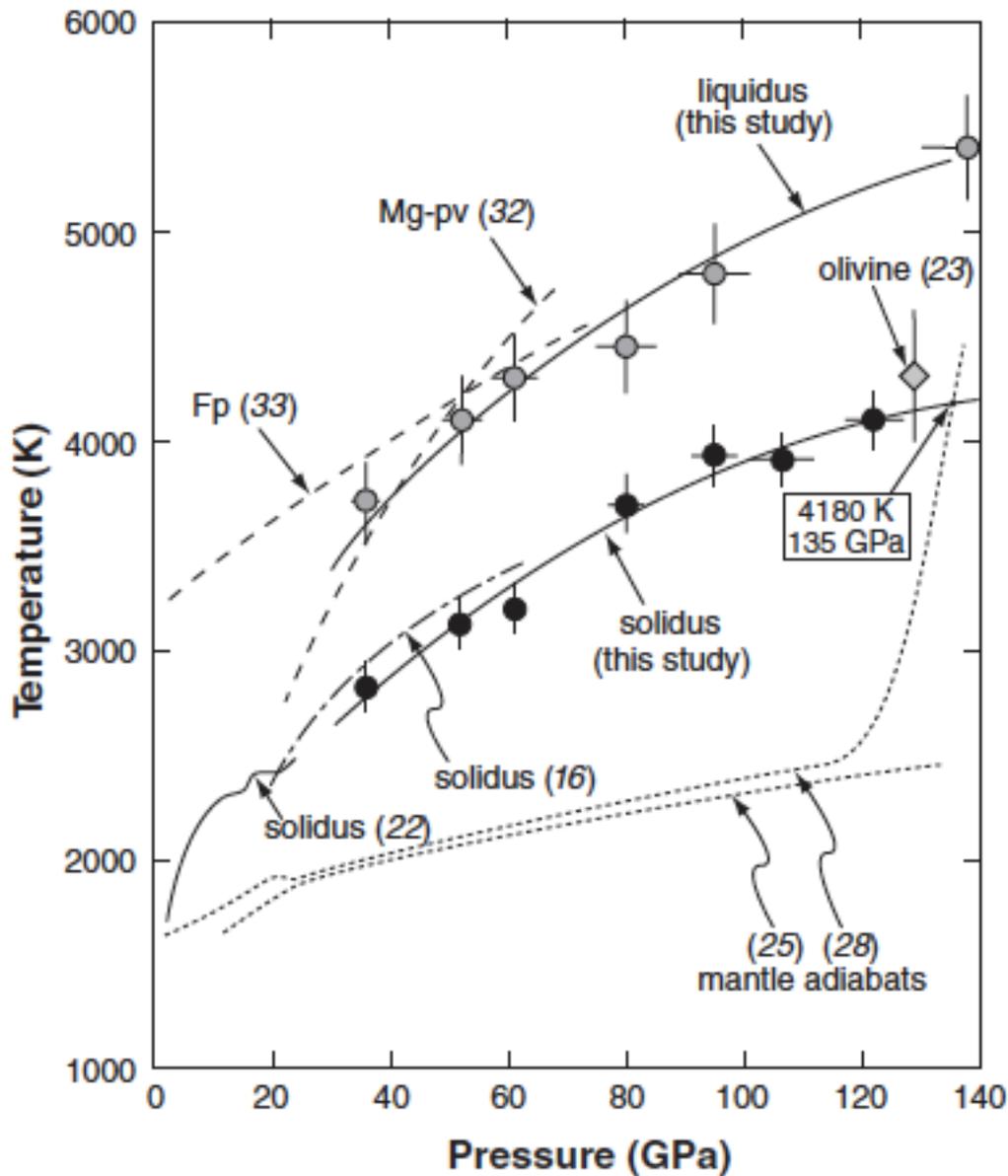
# Fusion partielle dans la D''?

- Formation d'une couche de matériau en fusion tôt dans l'histoire de la terre (*Labrosse et al., 2007*)
- Survie de cette couche dépend de sa stabilité chimique et gravitationnelle
- Pourrait être le réservoir géochimique peu ou non échantillonné renfermant de nombreux éléments incompatibles, en particulier les éléments radioactifs producteurs de chaleur
  - > conséquences sur le flux de chaleur à travers la CMB, la dynamique du manteau inférieur, et les réactions chimiques entre le noyau et le manteau

# Fusion partielle dans la D''?

- Température maximale du solidus de  $(\text{Mg,Fe})\text{O}$  et  $(\text{Mg,Fe})\text{SiO}_3$  par expériences d'ondes de choc:  $4300 \pm 270$  K is  $130 \pm 3$  Gpa  $\rightarrow$  fusion partielle possible dans la D'' (*Holland and Ahrens, 1997*).
- T de fusion de  $\text{MgSiO}_3$  à la CMB par expériences en DAC :  $7000\text{-}8500$  K (*Zerr and Bohler, 1993*) ;  $4500 \pm 350$  K (*Heinz et al., 1994*)
- T de fusion de  $\text{MgO}$  extrapolé à  $133$  GPa  $\rightarrow 5100 \pm 750$  K
- Résultats discordants!

- *Fiquet et al. (2010)*: Expériences de fusion sur une peridotite fertile (KLB\_1)  
P=36-140GPa (LHDAC + synchrotron)
  - Températures du solidus et liquidus jusqu'aux profondeurs de la CMB
  - >Solidus très proche du géotherme moyen à la base du manteau:
    - fusion partielle possible à l'heure actuelle à la CMB
    - Couche d'épaisseur ~35 km
  - Ils observent un enrichissement de (Mg, Fe) O en Fe dans la partie fondue, qui serait donc plus dense que le résidu solide de Pv appauvrie en Fe



Fusion partielle possible à la base du manteau

Solidus serait très proche du géotherme moyen:

=> observations d'ULVZ seulement dans les endroits plus chauds

- Conclusion:

- les deux interprétations des ULVZ paraissent possibles à l'heure actuelle:
  - Variations de composition à l'état solide
  - Fusion partielle, avec enrichissement en fer
- Il faudrait pouvoir préciser mieux l'anomalie de densité mesurée sismiquement

Transition de spin dans le fer aux pressions du manteau inférieur

Multi-electron  
Atom in a crystal field

One-electron atom			Multi-electron atom	Multi-electron Atom in a crystal field	
$l=0$	$l=1$	$l=2$	$3d$	$3d_{3z^2-r^2}$	$m=+2$
$n=3$ <u>3s</u>	<u>3p</u>	<u>3d</u>	<u>3p</u>	<u><math>3d_{x^2-y^2}</math></u>	$m=+1$
				<u><math>3d_{yz}</math></u>	$m=0$
				<u><math>3d_{xz}</math></u>	$m=-1$
				<u><math>3d_{xy}</math></u>	$m=-2$
			<u>3s</u>		
$n=2$ <u>2s</u>	<u>2p</u>				
$n=1$ <u>1s</u>					

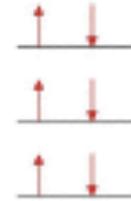
# Transition de spin dans le fer ( $\text{Fe}^{++}$ ) aux pressions du manteau inférieur

## Magnetic Collapse

Origin



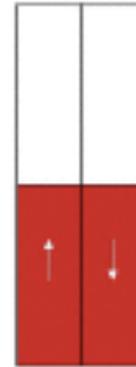
Levels



Low Pressure

High Pressure

Bands

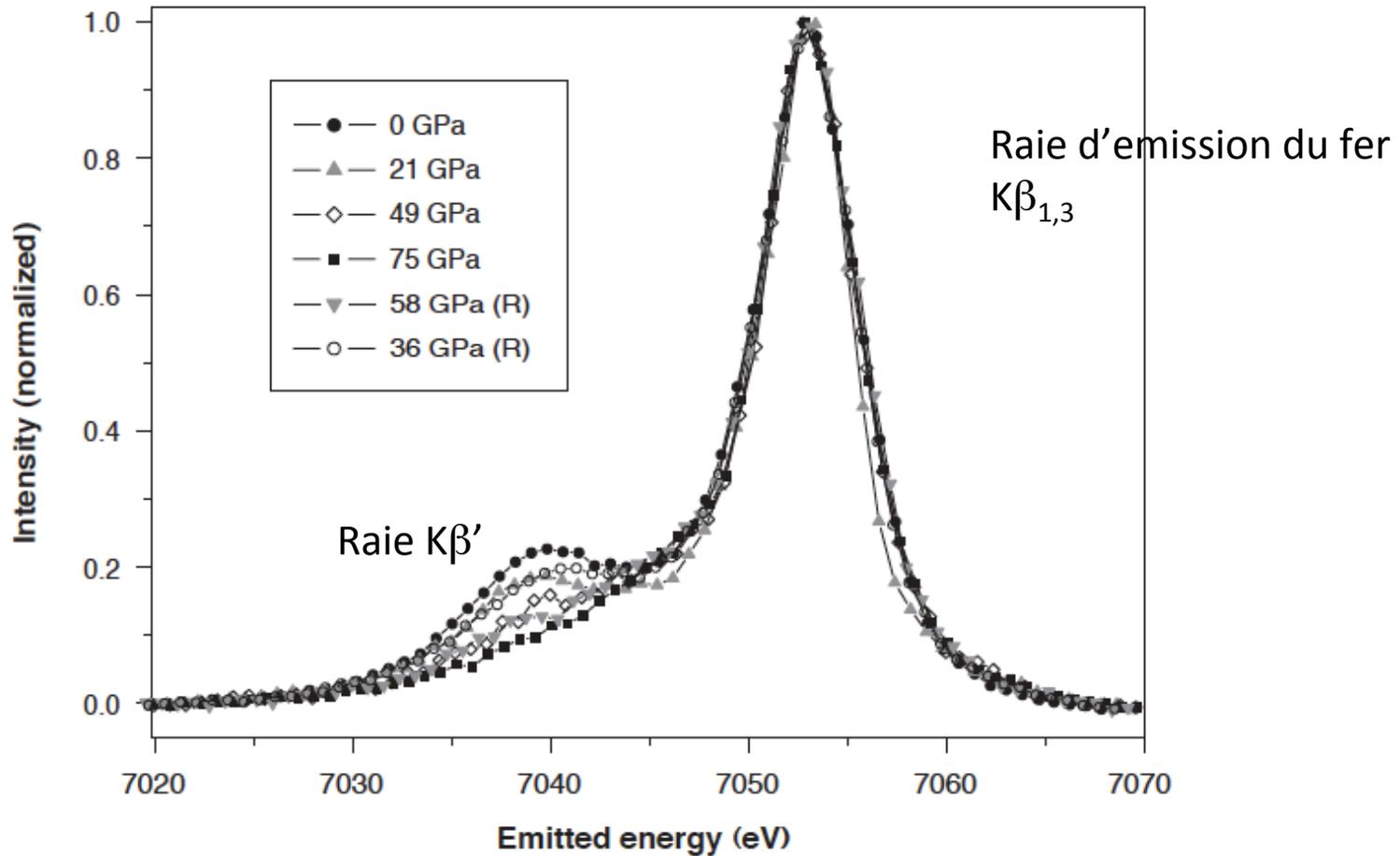


# Transition de spin dans le fer aux pressions du manteau inférieur

- Transition du fer HS- $\rightarrow$ LS découverte expérimentalement dans le ferropericlasé à 60-70 GPa (*Badro et al., 2003*) (T ambiante)
  - $\rightarrow$  Coefficient de partition pour le fer entre Pv et fpc change dans le manteau profond ( $d > 2000$  km), plus de fer dans le fpc
  - $\rightarrow$  manteau profond en 2 couches
    - Couche moins profonde, partition 50-50 entre Pv et fpc
    - Couche profonde, Fe principalement dans fpc
  - Conséquences dynamiques et sismiques
    - Transition graduelle  $\rightarrow$  hétérogénéité (pas de discontinuité sismique)
    - Viscosité plus élevée de la perovskite  $\rightarrow$  stabilisation dynamique

Mg<sub>0.83</sub>Fe<sub>0.17</sub>

Spectre d'émission rayons X



Caractéristique  
du moment magnétique local 3d  
dans les métaux de transition

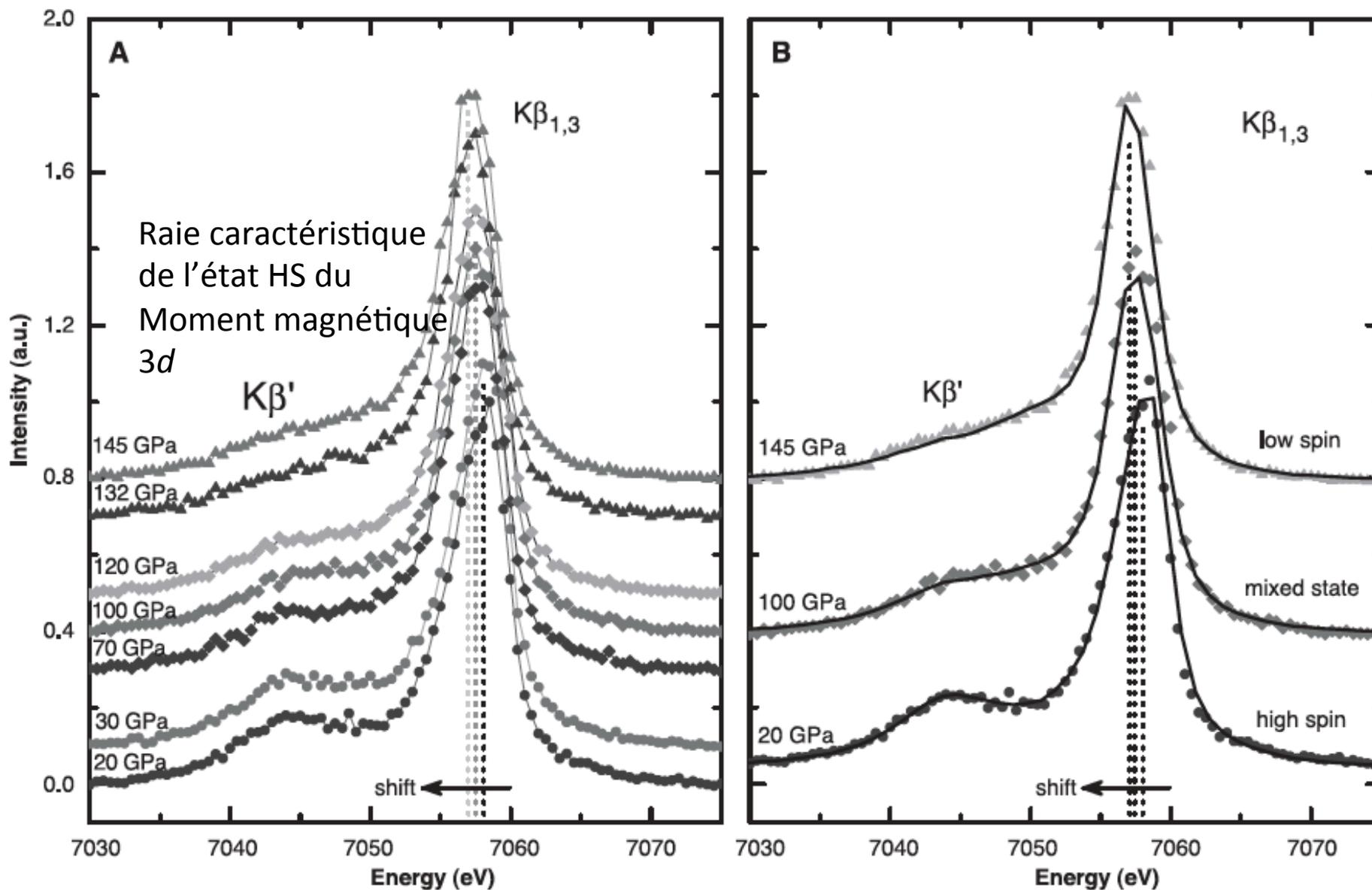
*Badro et al., 2003*

# Transition de spin dans le fer aux pressions du manteau inférieur

- Trois méthodes de transfert de chaleur
  - Conduction, radiation, convection
- Importance des conditions de conduction et radiation sur la dynamique du manteau
- (Mg, Fe) SiO<sub>3</sub> et (Mg, Fe) O phases les plus abondantes dans le manteau inférieur
  - (Mg, Fe)O: transition HS → LS du Fe entre 60-70 Gpa (Badro et al., 2003)
  - (Mg, Fe) SiO<sub>3</sub> HS→LS 70 et 130 Gpa (Badro et al., 2004)
  - Influence sur les coef. de partition et la fusion partielle (non vérifié expérimentalement )
  - Propriétés radiatives
    - Les deux phases deviennent plus transparentes aux radiations dans l'infrarouge dans le manteau profond=> conséquences sur la dynamique

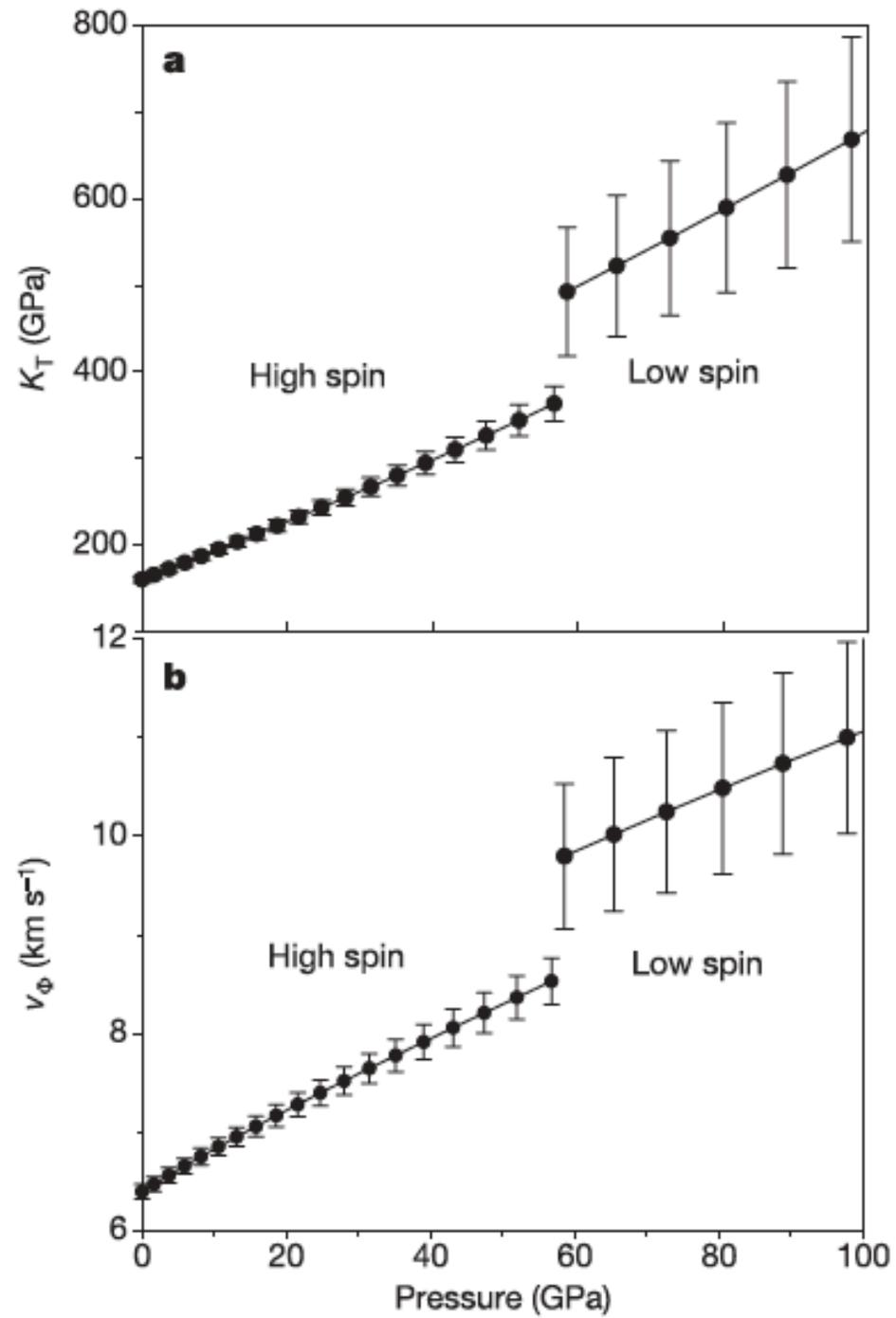


Spectres d'émission de rayons X



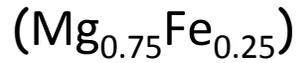
# Effet sur l'élasticité

- Transition de spin dans le fpc (*Liu et al., 2005*)
  - Augmentation du coef. d'incompressibilité  $K$  et de  $V_\phi$  de 15% dans ( $\text{Mg}_{0.83}\text{Fe}_{0.17}$ )
    - -> hétérogénéité sismique (e.g. anticorrelation  $V_s$  et  $V_\phi$ ) et variation du rapport  $R = d\ln V_s / d\ln V_p$  avec la profondeur
    - -> effet sur  $V_s$ ? - reste à estimer
  - mais pas d'augmentation de densité notable (*Catalli et al., 2010*)

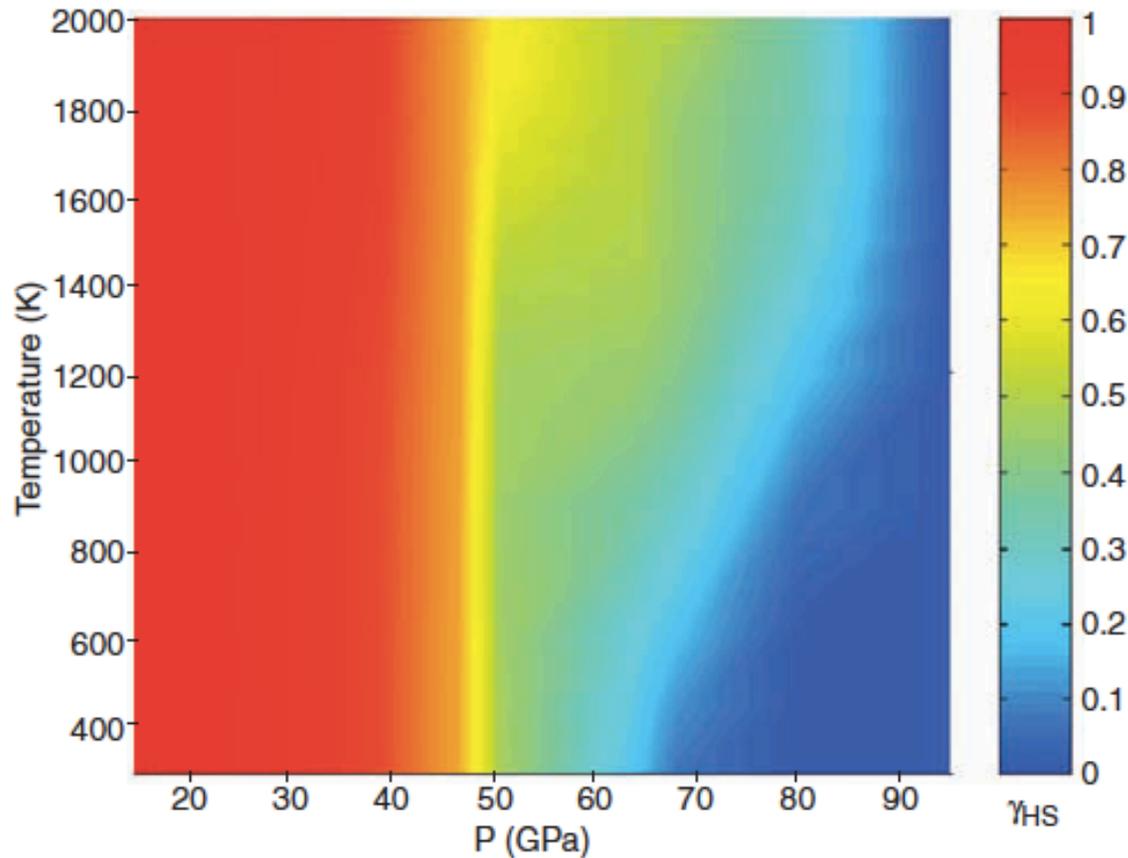


T ambiente

*Lin et al.*  
2005

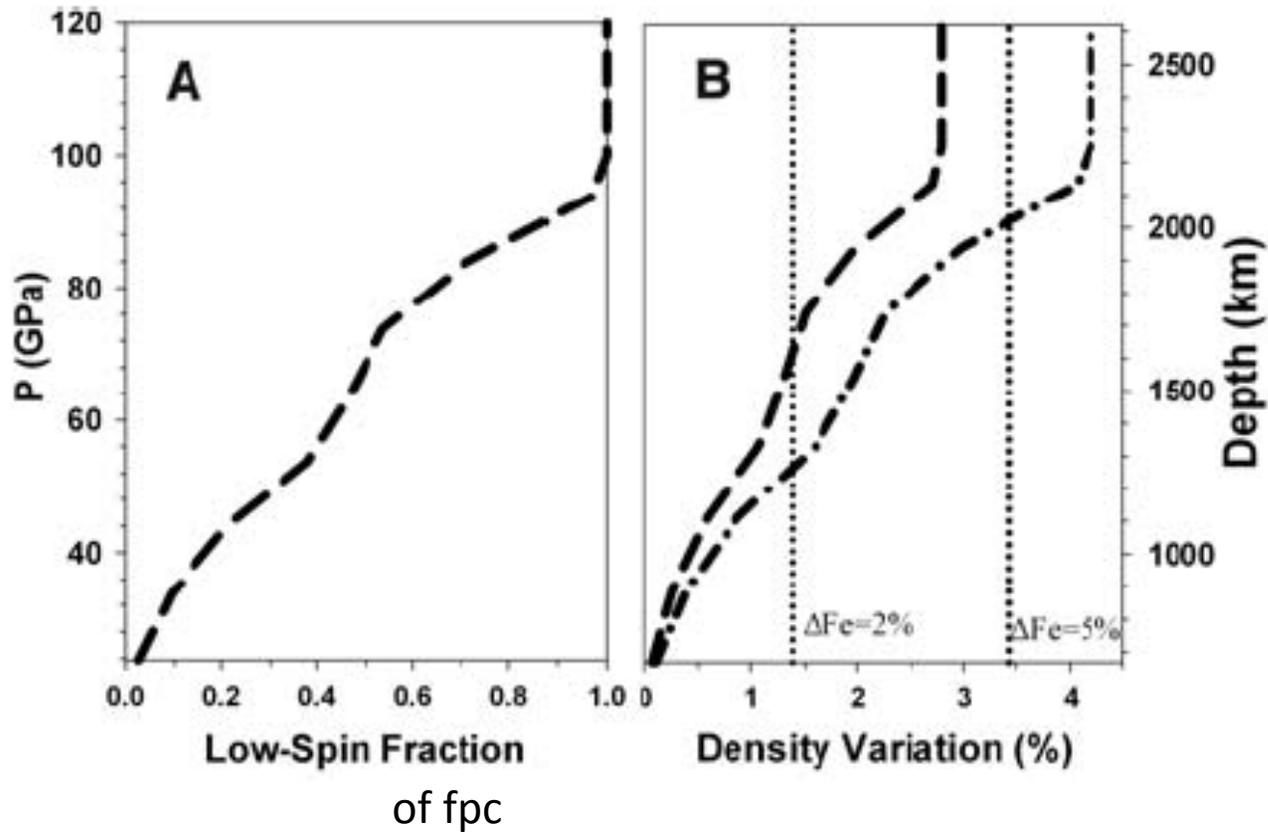


## Expériences à haute T



- > Dans le manteau: transition entre 1000-2200 km de profondeur  
T=1900-2300K
- > transition continue: pas de changement abrupt des propriétés sismiques
- > gradient de densité anormal dans la zone de transition HS->LS

*Lin et al., 2007*



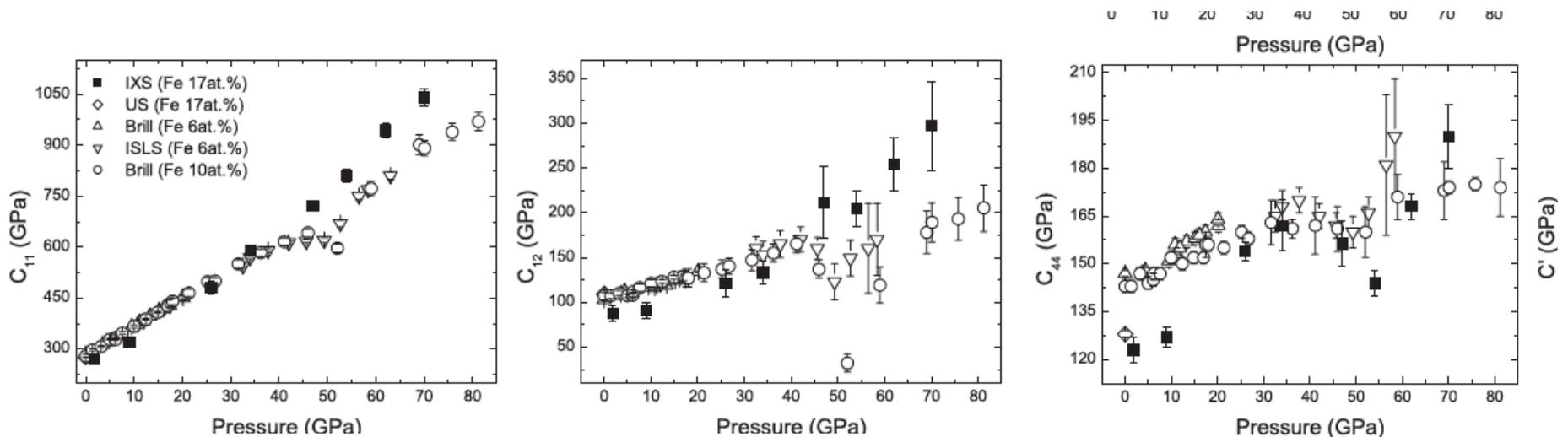
-> Importance de connaître la proportion de HS et LS à chaque profondeur dans le manteau inférieur

# IXS = Inelastic X ray Scattering

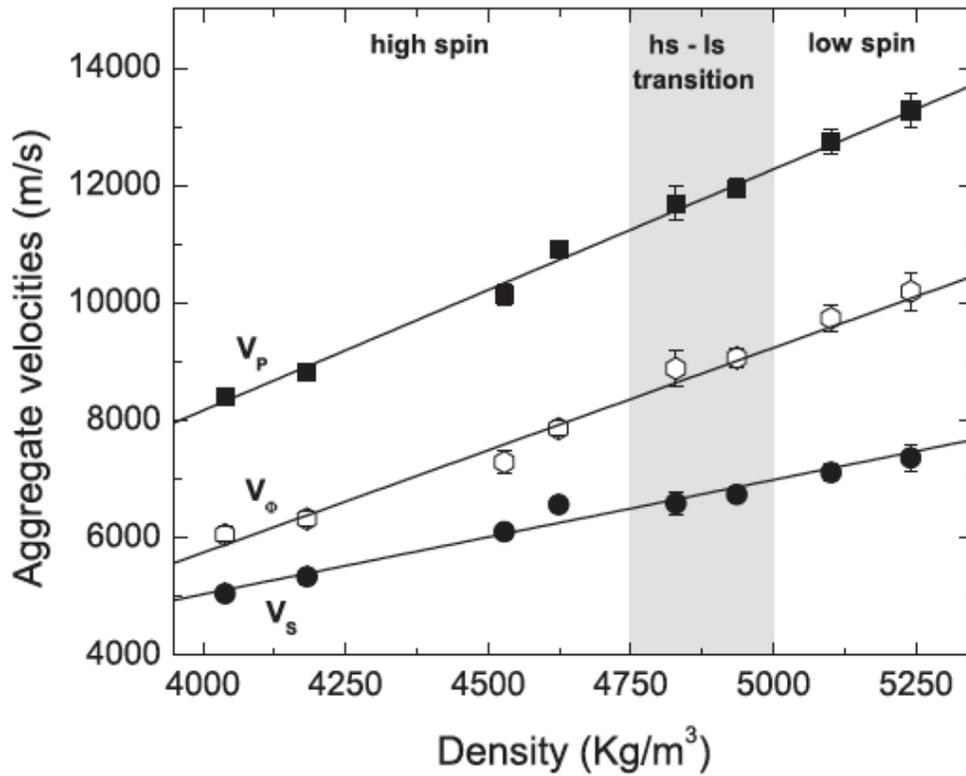
-> Mesure du tenseur élastique complet (dispersion des phonons de modes acoustiques longitudinaux et transversaux)

-> détermination in situ de la densité

-> marche sur des échantillons à forte teneur en fer (17% molaire)



*Antonangeli et al., 2011*

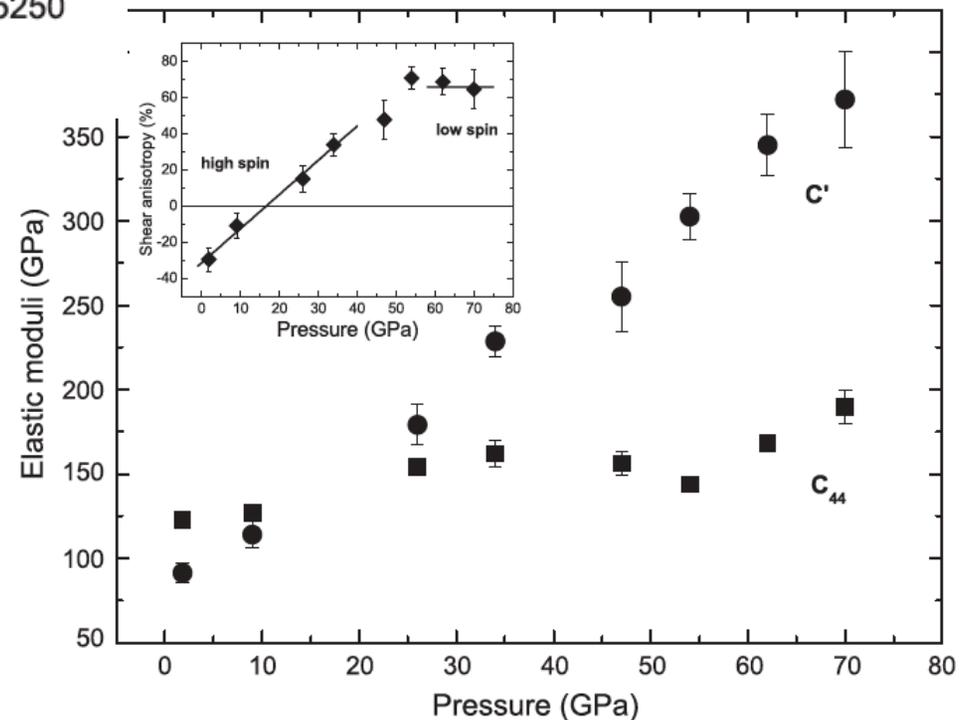


Pas d'effet sur les vitesses sismiques isotropes (moyennes de Voigt-Reuss-Hill)  
 - Valeurs très proches de celle de la  $v_p$

Effet sur l'anisotropie en  $v_s$ :  
 Augmentation importante au passage HS  $\rightarrow$  LS

Résultats à confirmer à haute température

*Antonangeli et al., 2011*



# Dynamique du manteau profond

- Le comportement dynamique d'une couche de matériau dense est contrôlé par 2 quantités sans dimension:

– Le nombre de Lewis:

$$Le = \frac{K_T}{K_C}$$

Diffusivité thermique  
Diffusivité chimique

– Le rapport de flottabilité (buoyancy number):

$$B = \frac{\Delta\rho_C}{\Delta\rho_T} = \frac{\Delta\rho_C}{\rho\alpha\Delta T}$$

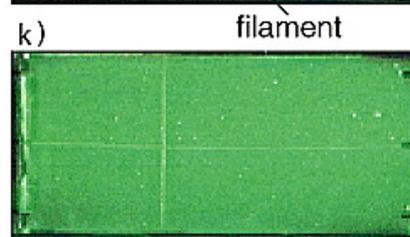
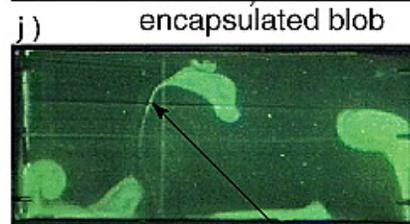
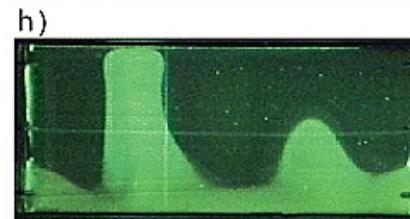
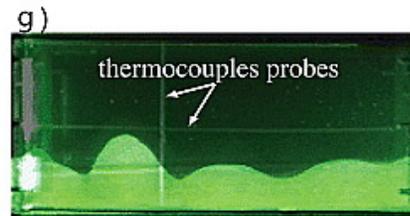
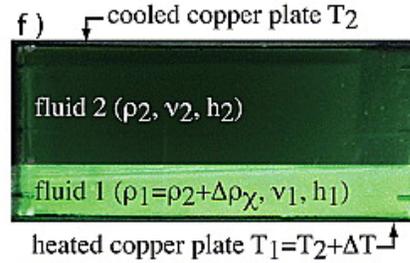
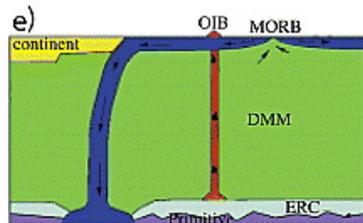
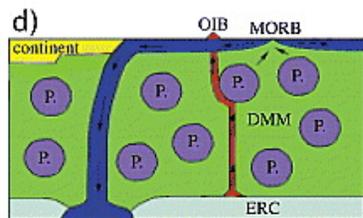
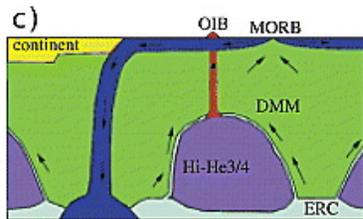
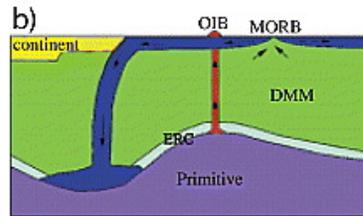
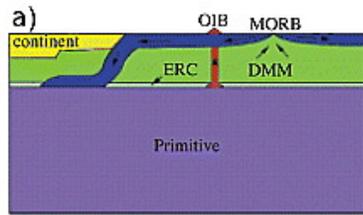
$\alpha$  expansion thermique  
 $\Delta T$  contraste de température

- Dans un système en convection simple (propriétés constantes), si  $\Delta T$  est la différence de température à travers le manteau, la stabilité de la couche dense s'exprime par:

$$B = \frac{\Delta\rho_C}{\Delta\rho_T} = \frac{\Delta\rho_C}{\rho\alpha\Delta T} > 1 \quad \text{Couche dense stable à long terme}$$

- $0.5 < B < 1$  couche stable mais avec topographie importante
- $B < 0.5$  couche instable: mélange rapide

# Modèles conceptuels du manteau



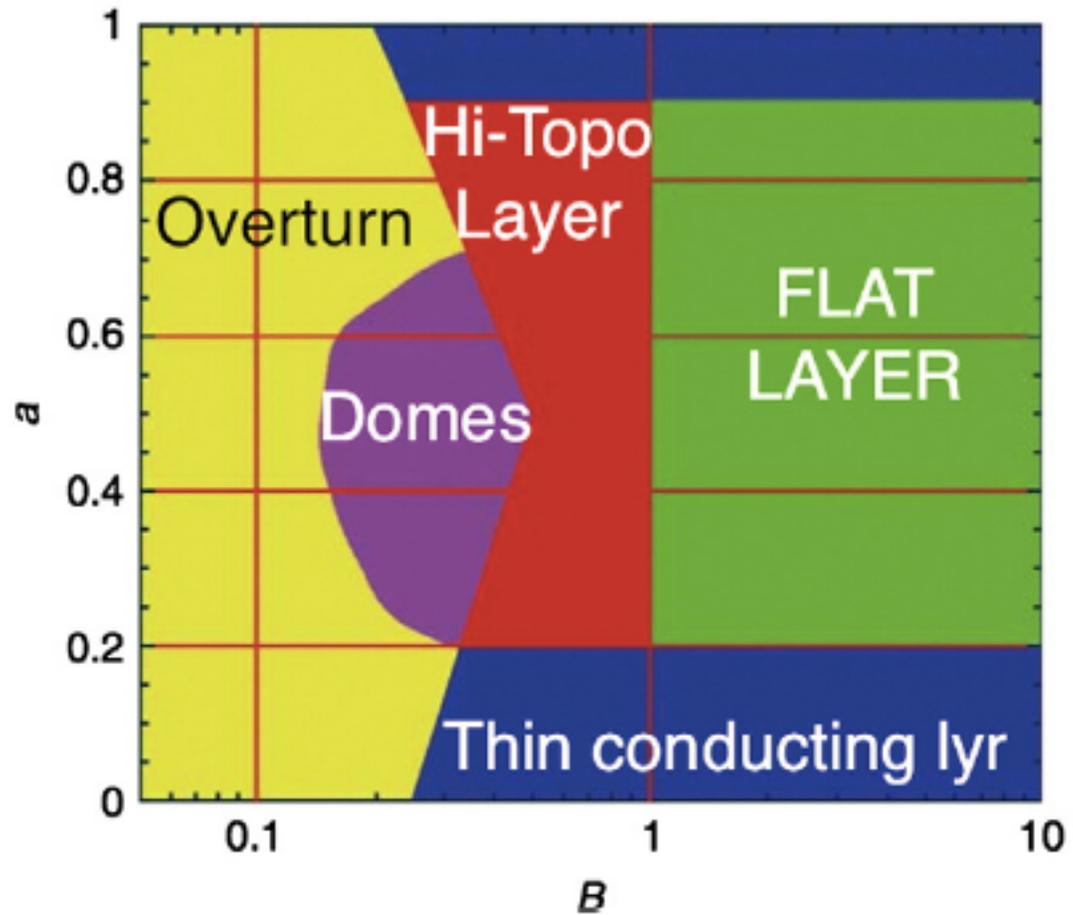
Expériences à 2 couches miscibles

Evolution temporelle d'un choix particulier de paramètres (B=0.30)

LeBars and Davaille, 2004

# Etude systématique en laboratoire

Topographie dépend  
de  $B$  et du nombre de  
Rayleigh  $R$



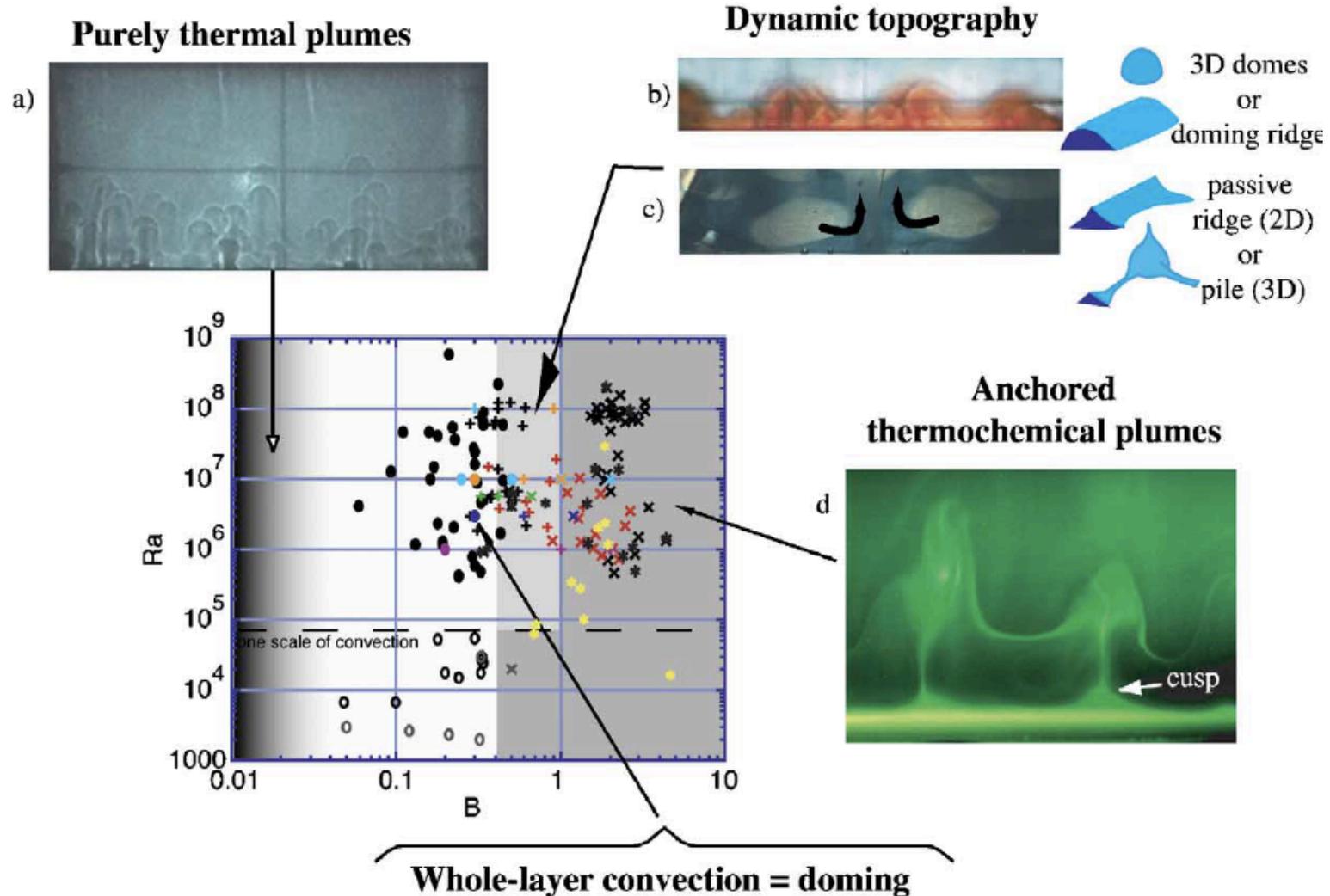
$a$  = épaisseur initiale de la couche dense

*Le Bars and Davaille, 2004  
Repris par Tackley (2012)*

Différents types de panaches suivant le nombre de Rayleigh  $Ra = \alpha g \Delta T H^3 / \kappa \nu$ ,

Manteau de composition homogène:

Convection influencée par la différence de composition

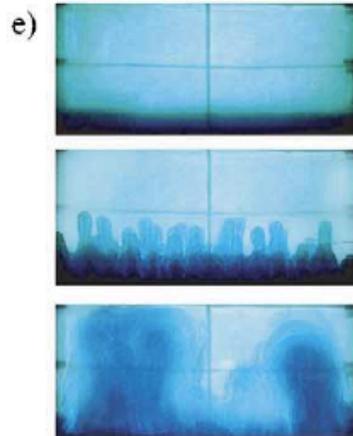


--Davaille et al., 2005

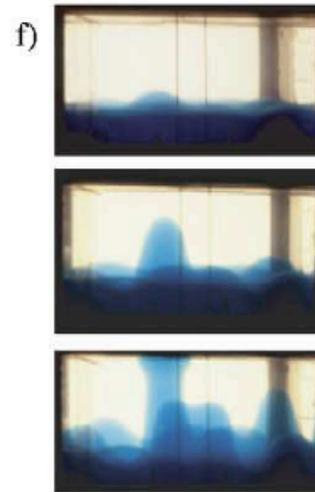
Whole-layer convection = doming

*less viscous invading*

*more viscous invading*

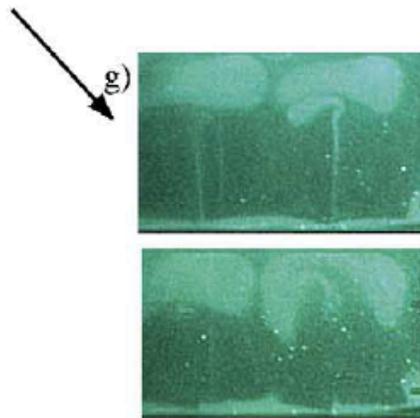


OR

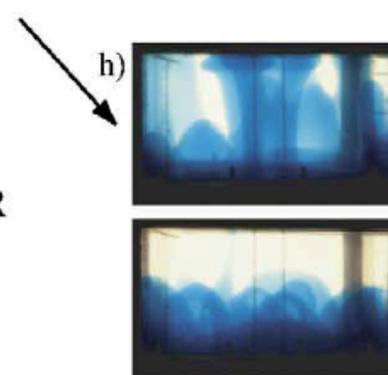


Cavity plumes

Diapiric plumes



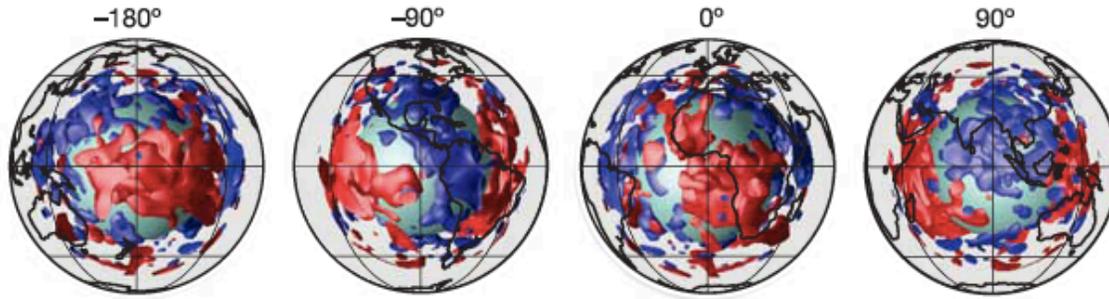
OR



- Calculs en 3D avec le code CITCOM-S
  - Permet des géométries réalistes
- Viscosité dépend de la température
  - Free slip surface boundary conditions
  - Conditions initiales: Couche dense à la base du manteau
  - => structures denses et déformables se forment à la base du manteau, balayées par les courants descendants pour former des crêtes linéaires
    - On ne reproduit pas la forme arrondie de la LLSVP du Pacifique
- McNamara and Zhong (2005) proposent d'inclure comme conditions limites, l'histoire de la subduction

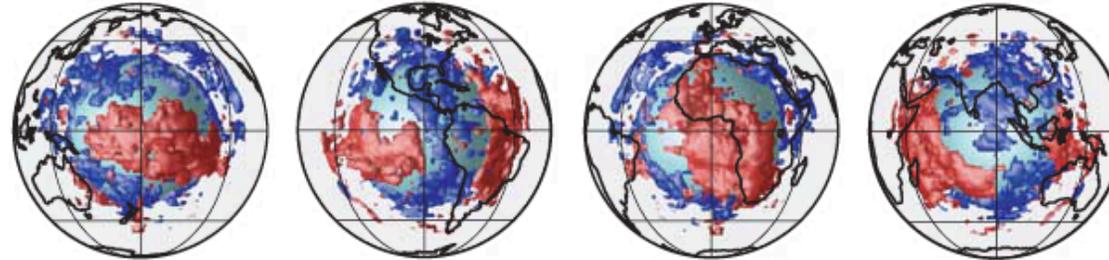
- Conditions initiales:
  - Couche d'anomalie de densité 2-5% ( $B \sim 0.6$ )
  - Epaisseur 127, 255, 956 km
  - 11 étapes de l'histoire de la tectonique des plaques (subduction), sur 120 Ma
- CITCOM-S, haute résolution
- Utilisation de traceurs pour la distribution des hétérogénéités chimiques
- Nombre de Rayleigh  $2.7 \times 10^8$
- Viscosité dépend de la profondeur et de la température
  - Saut de  $\eta$  facteur 30 à 660 km
  - Chauffage par le bas et interne

$|\delta v_s| > 0.6\%$   
(1,100–2,891 km)  
Ref. 4



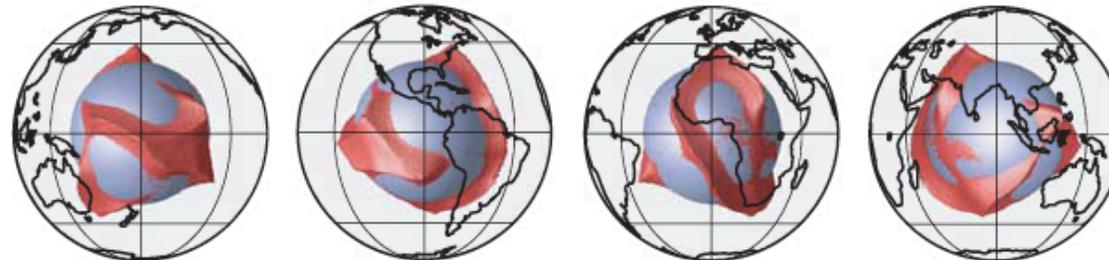
Ritsema  
1999

$|\delta v_s| > 0.7\%$   
(1,100–2,891 km)  
Ref. 7

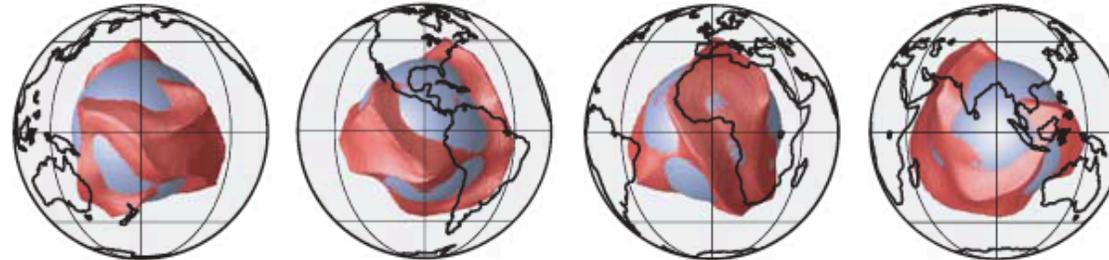


Grand 2002

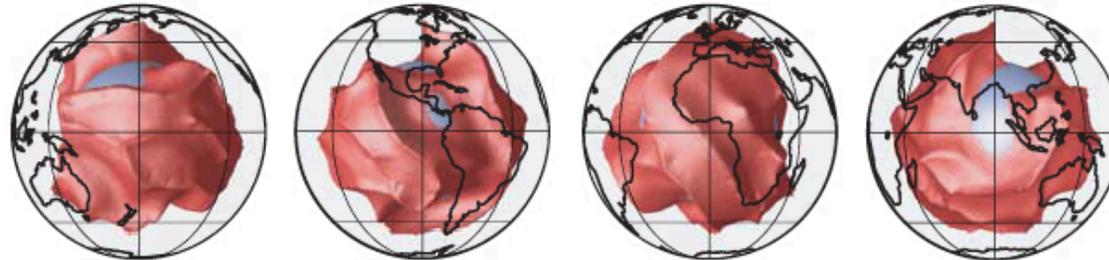
$D_1 = 127$  km



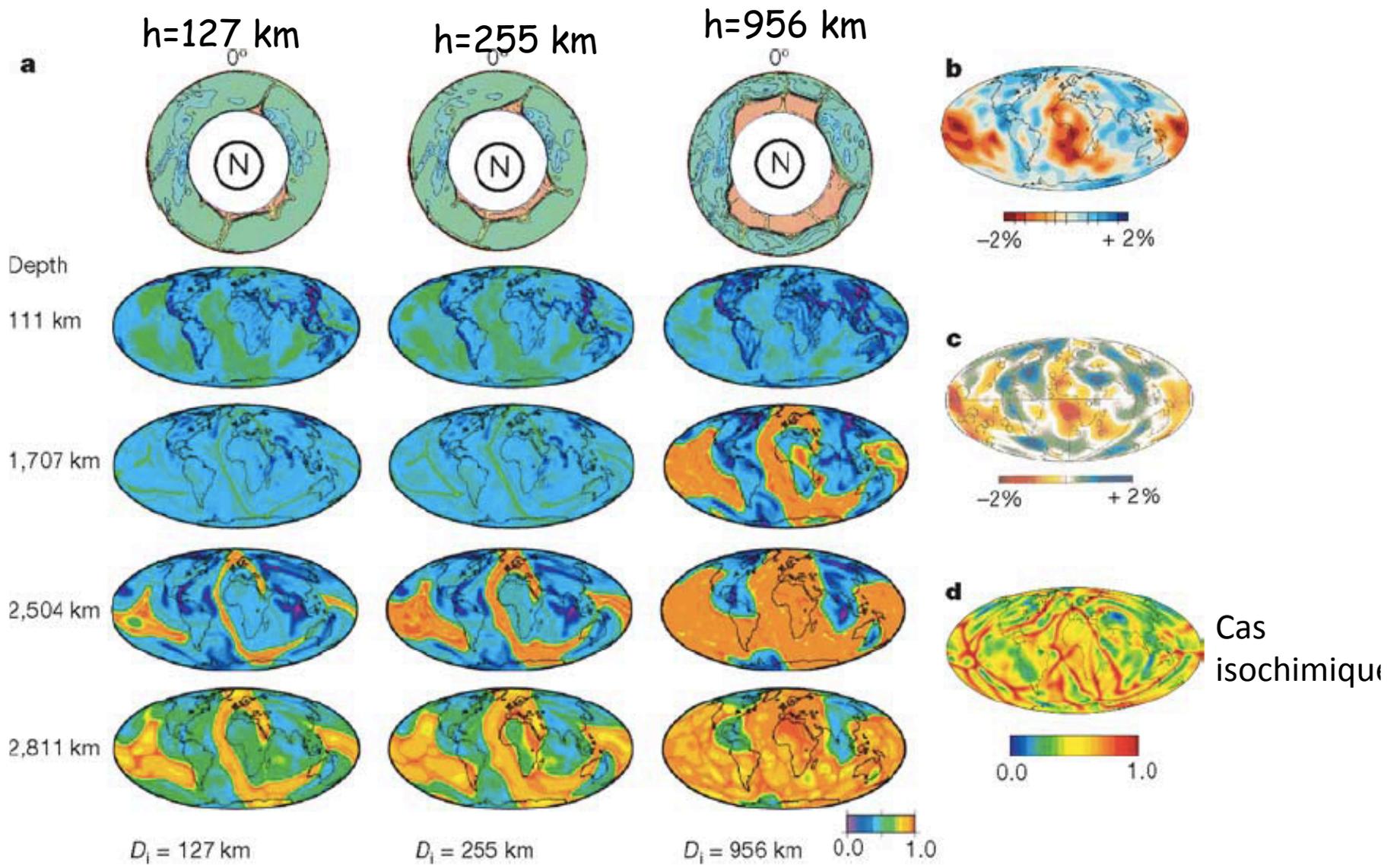
$D_1 = 255$  km



$D_1 = 956$  km



*McNamara  
and Zhong  
2005*

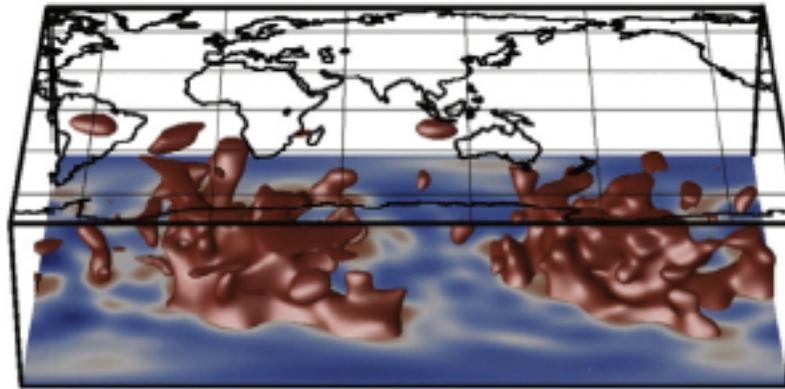


Profils de température

*McNamara  
and Zhong  
2005*

Tomographie  
sismique

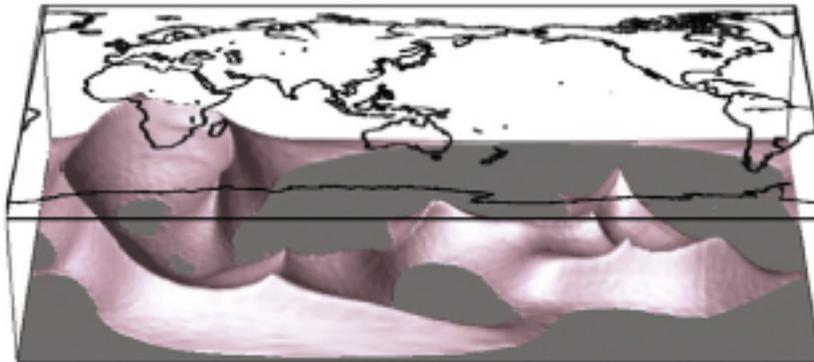
a) Shear-wave tomography



S20RTS,  
Ritsema et al., 1999

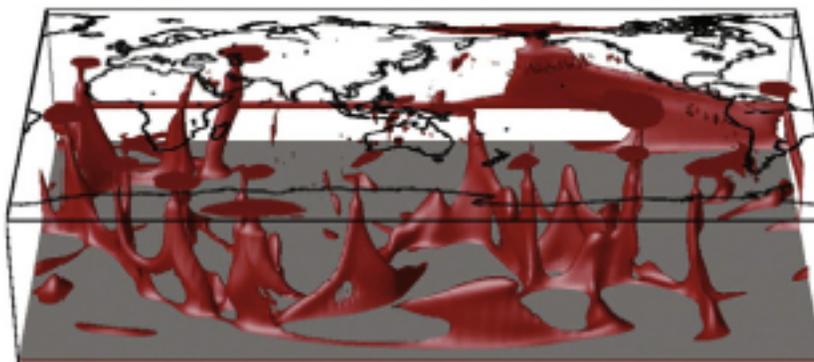
Modèle  
thermochimique

b) Thermochemical Piles



Modèle purement  
thermique

c) Plume Clusters



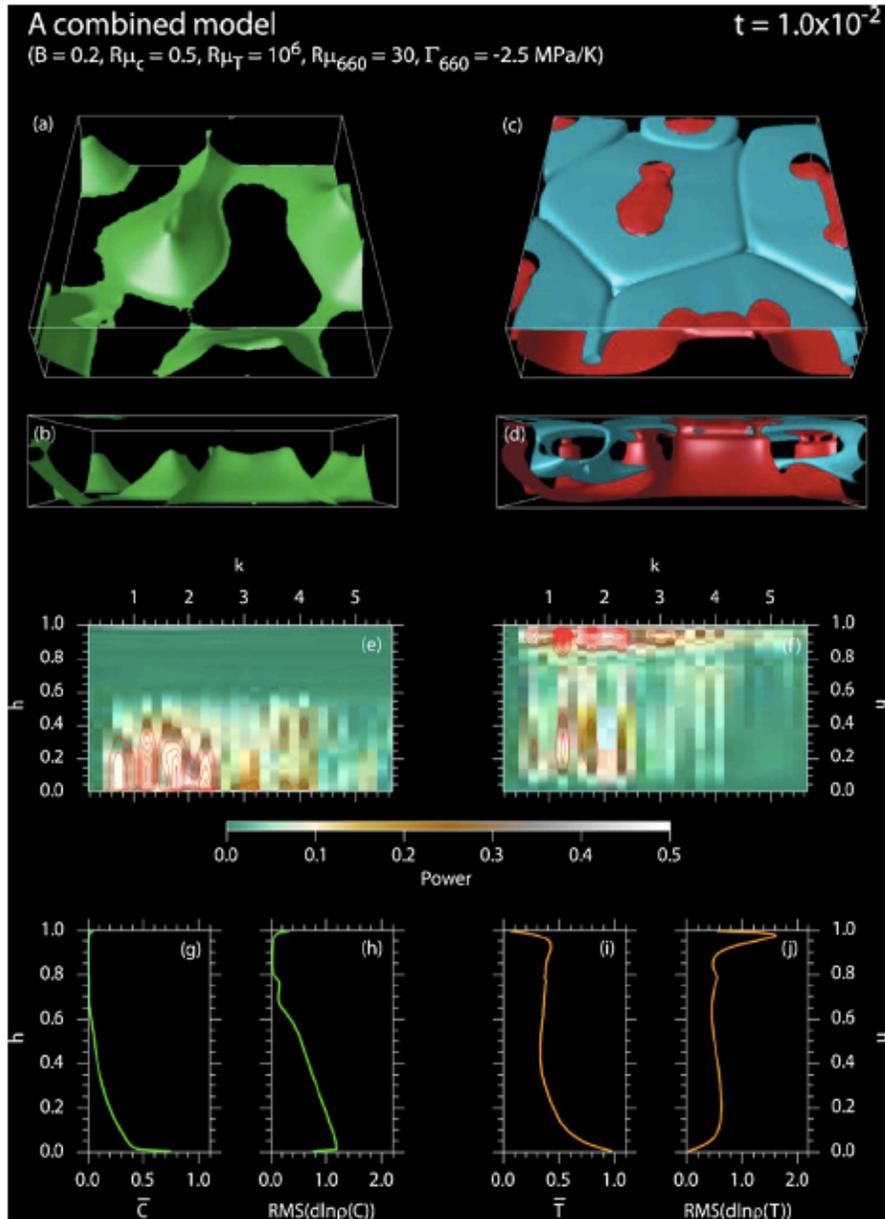
*Lassak et al.,  
2010*

Influence de la composition et température sur la viscosité  
 Influence de la pente de Clapeyron de la discontinuité de 660 km

Champ de composition

Champ de température

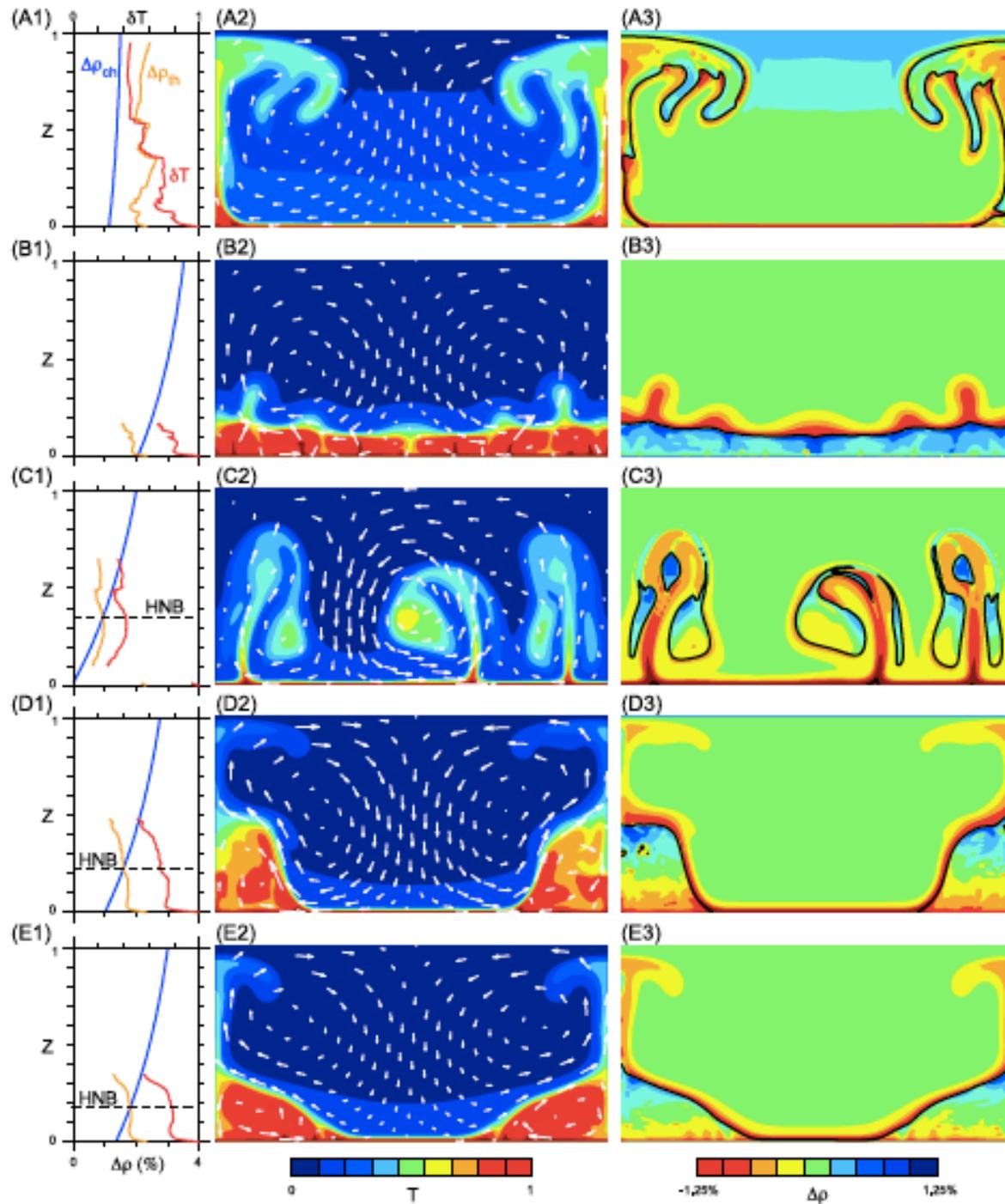
Spectres en longueur d'onde



## Bords abrupts des LLSVP: stabilité à long terme

- Modèle numérique de convection thermo-chimique compressible (*Tan and Gurnis, 2005, 2007*):
  - Exploration de paramètres pour évaluer la stabilité d'une couche de composition différente à la base du manteau
- > le contraste de densité compositionnel dans les LLSVP doit augmenter avec la hauteur au dessus de la CMB (pour contrebalancer l'augmentation de l'expansivité thermique)

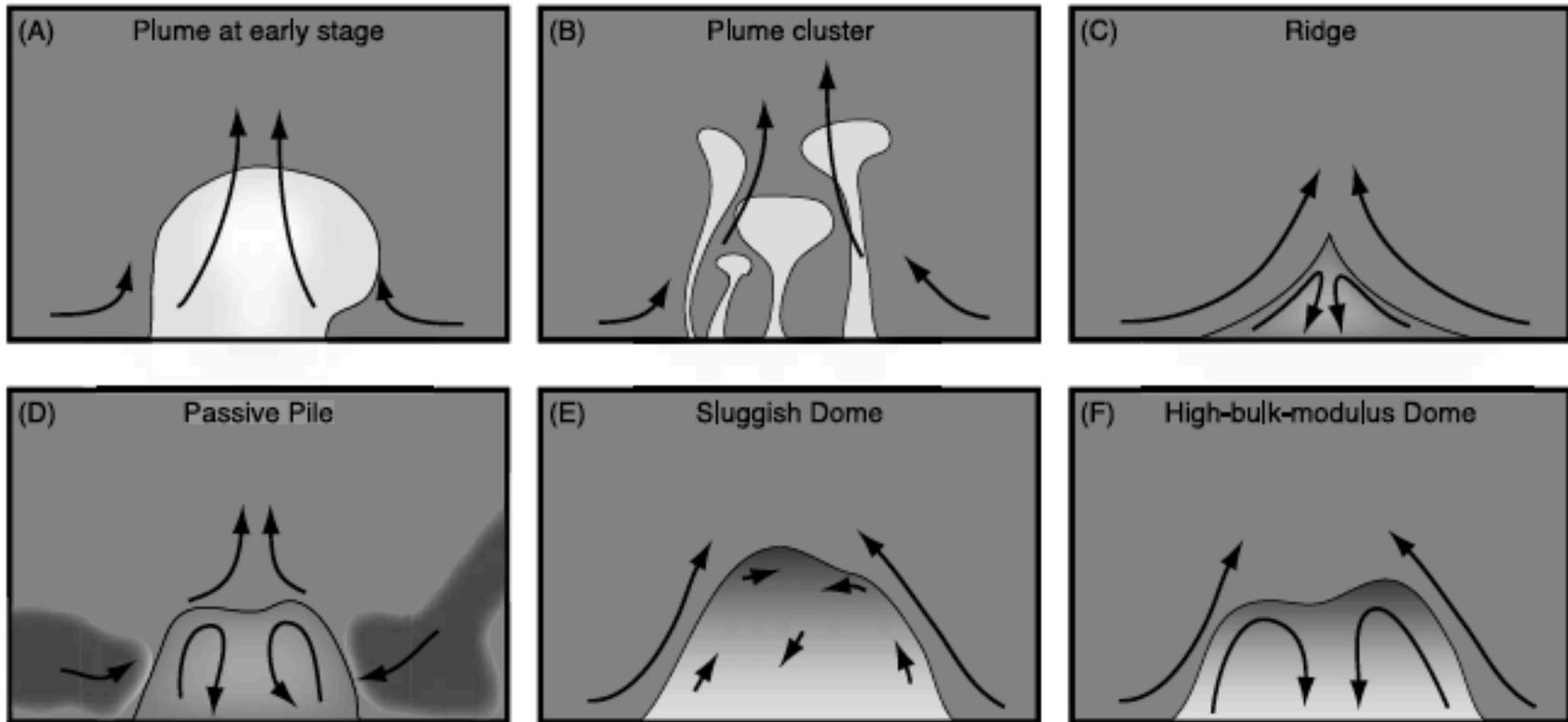
HNB=  
Height of  
Neutral  
Buoyancy



LLSVP?

*Tan and  
Gurnis, 2007*

# Scenarios possibles pour les LLSVP



Cas comparables aux observations sismologiques

Peut-on obtenir ce genre de comportement dans les MORB (croûte des plaques tombées au fond du manteau)?

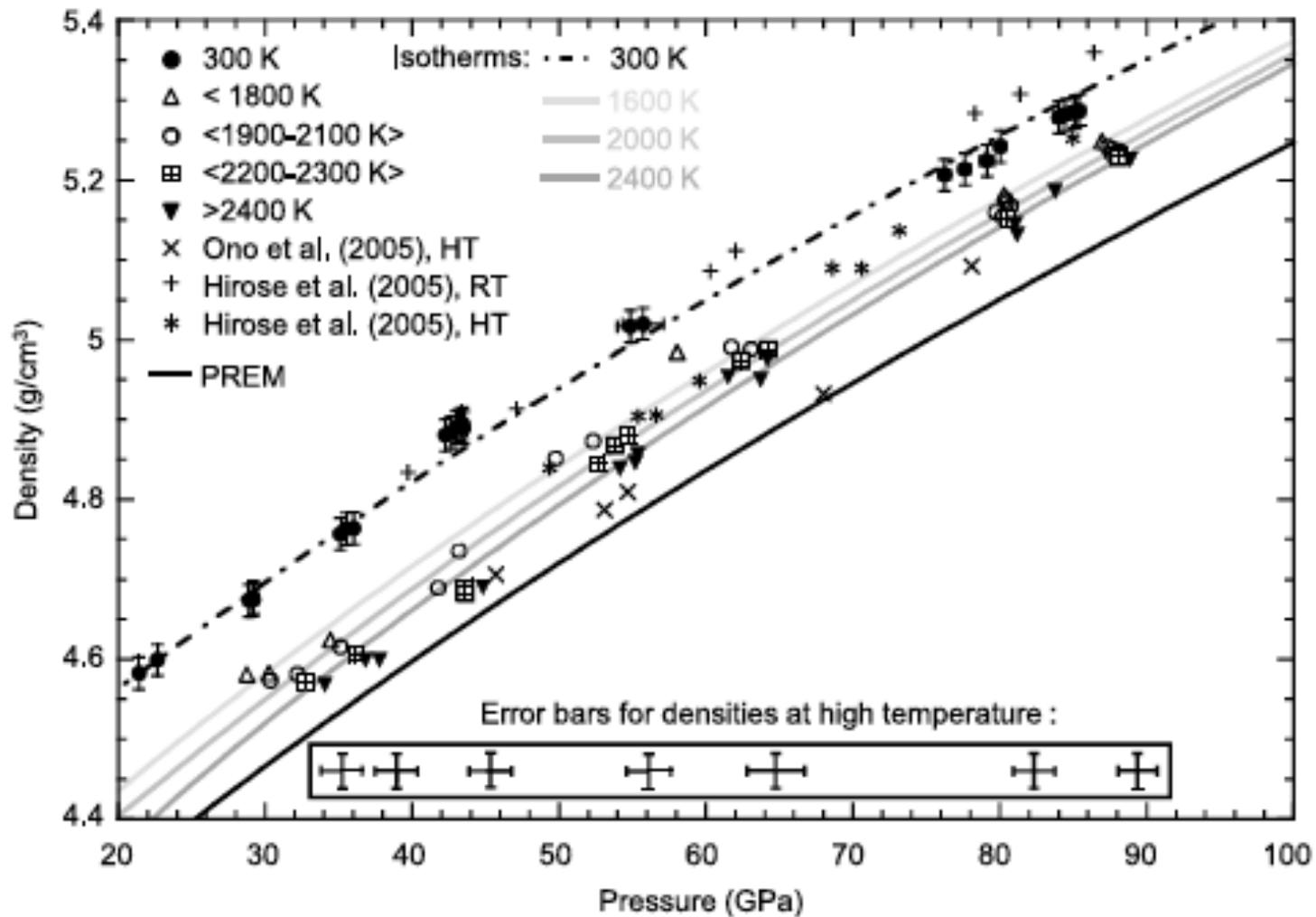
- - Densité du MORB en fonction de la pression ?
  - Résultats contradictoires:
    - MORB moins dense que le manteau à partir de 1500-2000 km (Ono et al., 2001)
    - - MORB plus dense que le manteau jusqu'à la CMB (Ono et al., 2005; Hirose et al., 2005)

De part sa formation, le MORB est enrichi en éléments incompatibles (Si, Al, Ca, Na) et appauvri en Mg par rapport à la pyrolite

-> Dans le manteau inférieur MORB ne contient pas de fpc mais du  $\text{SiO}_2$  + phases riches en Al

*Ricolleau et al. (2010)* étudient un échantillon de MORB naturel dans la DAC + XRD jusqu'à 89 Gpa et 2700K. Analysent la composition chimique et les phases formées par TEM (Transmission Electron Microscopy)

-> calcul du profil de densité du MORB pour différents géothermes.



⇒ La croûte des plaques (MORB) est plus dense que le manteau ambiant et peut donc atteindre la CMB (extrapolation:  
 ⇒  $\Delta\rho$ : 2-3% et >1% en tenant compte aussi de la transition Pv→pPv et de l'enrichissement en fer possible)

Il faut rajouter la partie "harzburgite" de la plaque, dont le comportement avec la profondeur est plus proche de la pyrolite (un peu moins dense, *Ricolleau et al., 2009*)

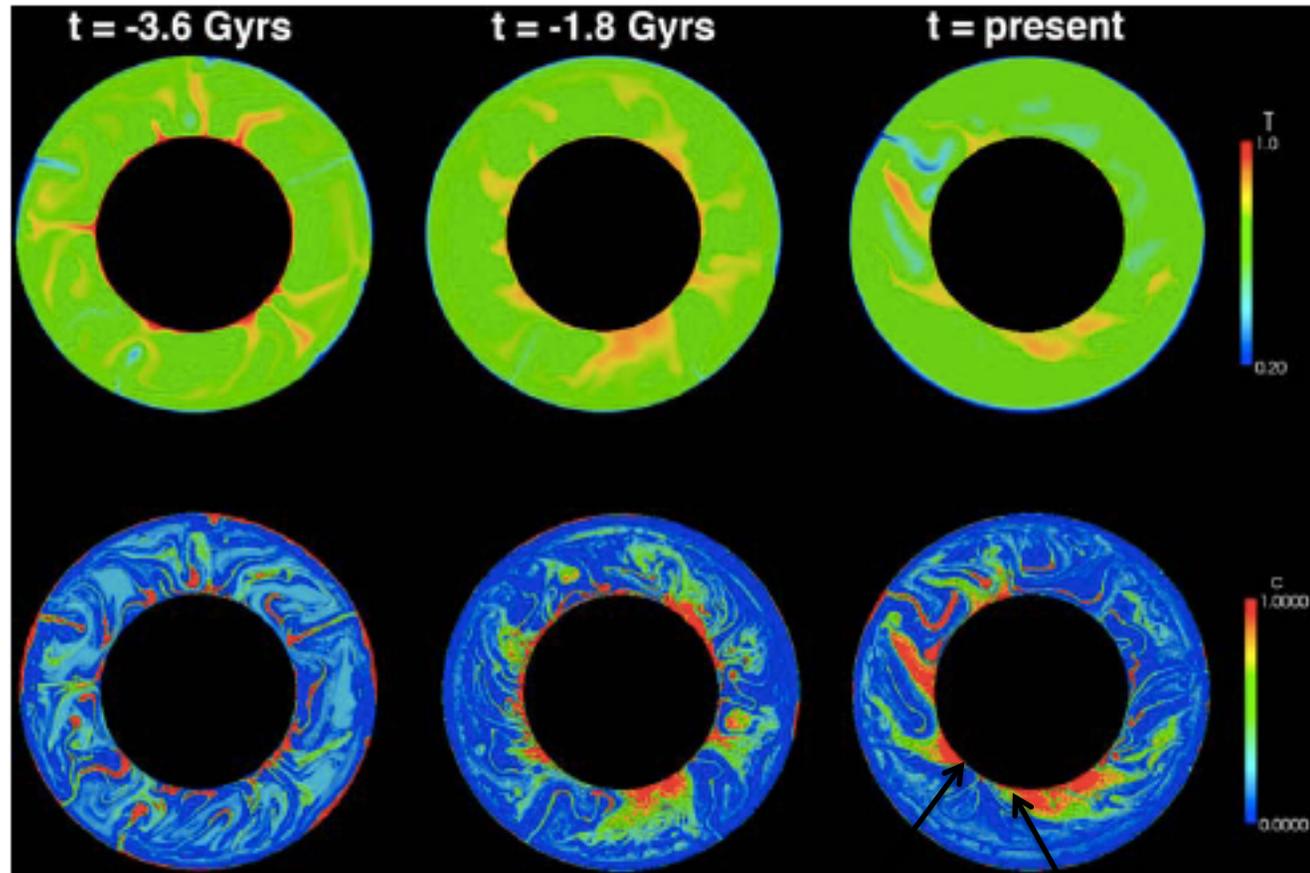
→ Modélisation dynamique (e.g. *Nakagawa and Tackley, 2010; Tackley, 2011*). Inclusion des effets suivants:

- plaques stratifiées (MORB+Harzburgite)
- discontinuité de 660 km
- transition de phase Pv-→pPv
- manteau compressible, viscosité =  $f(T)$

Manteau pyrolitique, hétérogénéités de composition formées par fusion aux rides et formation de croûte océanique

$$T_{CMB}=5912K$$

Température:



Composition

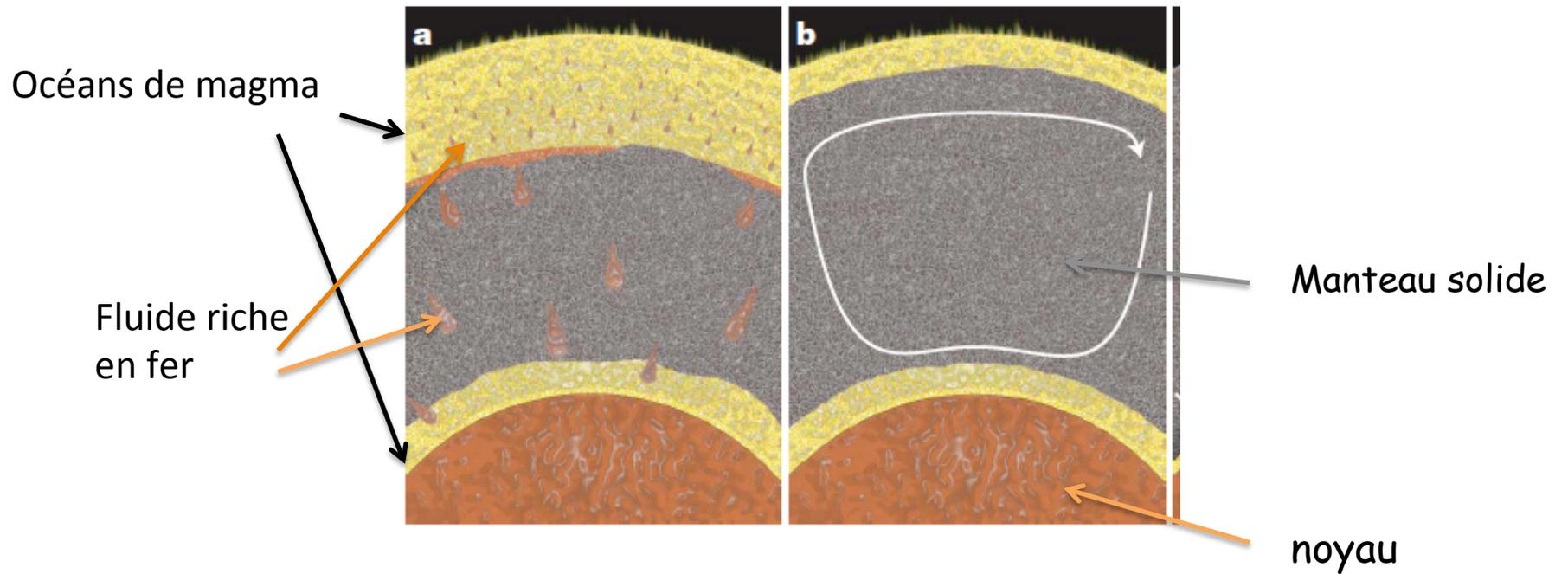
Rouge=MORB  
Bleu= harzburgite

Bords de "LLSVP" relativement stables

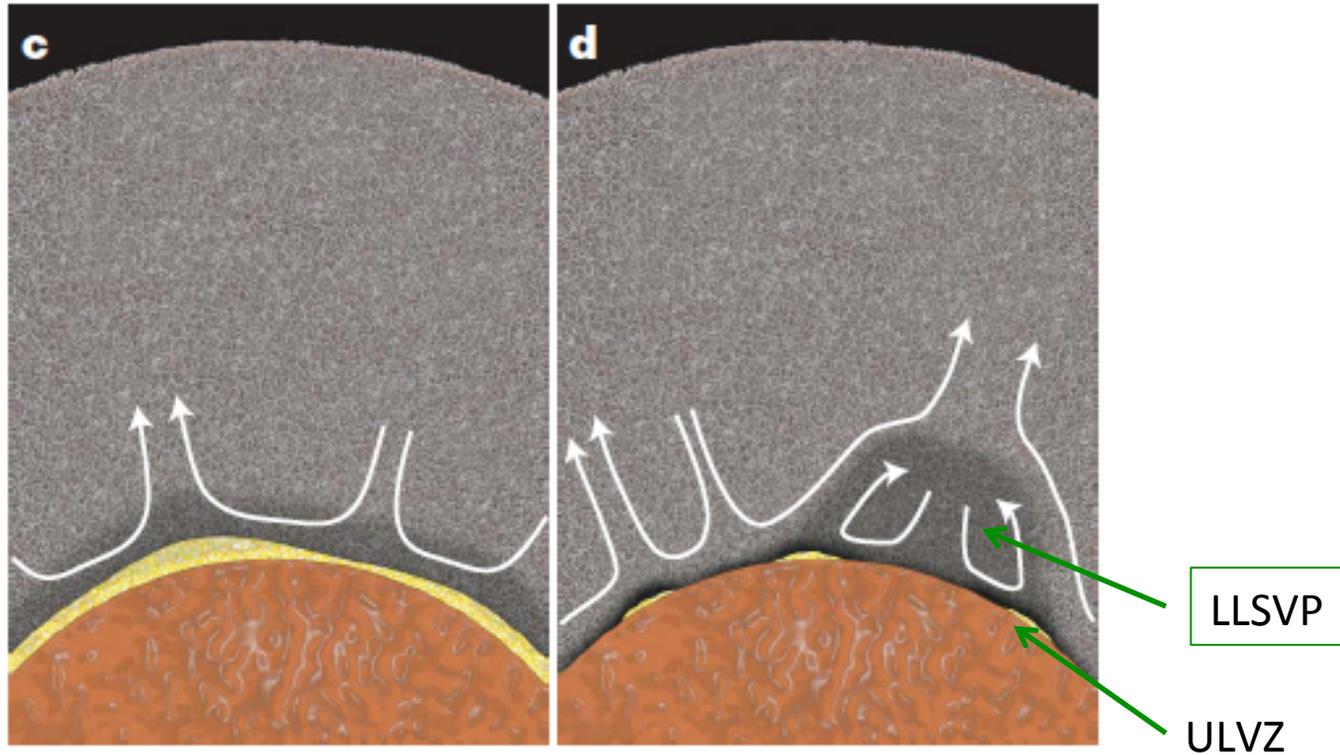
*Nakagawa and Tackley, 2010*

# Océan de magma primordial

- Labrosse et al. (2007) proposent la formation d'une couche stable de fluide dense tôt dans l'histoire de la terre suivie de cristallisation fractionnée lente
  - > pourrait représenter un "réservoir" d'éléments incompatibles, y compris les éléments radioactifs manquants
  - > couche doit être stable pour la gravité et la composition
    - plus dense que les solides du manteau (plus riche en Fe)
    - ne doit pas être absorbée par le noyau au cours du temps



Phase de cristallisation  
 Vitesses différentes en  
 haut et en bas



Cristallisation différentielle  
de l'océan de magma  
profond et formation de solides  
plus riches en fer à la base du manteau

Cette couche solide forme  
des piles sous les courants  
ascendants

# Conclusions générales

- Sismologie:
  - Présence à la base du manteau des LLSVP, ULVZ, anisotropie
    - > hétérogénéité de composition à confronter avec la géochimie
      - Plaques accumulées au cours du temps ou couche primordiale (issue d'un océan de magma)?
- Physique des matériaux:
  - Transformation de phase Pv->pPv
  - Transition de spin du Fe
  - Propriétés des matériaux aux P et T du manteau inférieur -> préciser la composition
- Géodynamique:
  - Modèles incluent des conditions de plus en plus réalistes